

Étude d'impact stratégique
du Plan d'intervention gouvernemental
de protection de la santé publique
contre le virus du Nil occidental

RAPPORT SECTORIEL

3

Revue des mesures de prévention et de protection contre le virus du Nil occidental

Québec

Étude d'impact stratégique
du Plan d'intervention gouvernemental
de protection de la santé publique
contre le virus du Nil occidental

RAPPORT SECTORIEL

3

Revue des mesures de prévention et de protection contre le virus du Nil occidental

Avril 2006



AUTEURS

Yolaine Labbé, M. Env.
Direction des risques biologiques, environnementaux et occupationnels
Institut national de santé publique du Québec

Bernard Aubé-Maurice, B. Sc.
Direction des risques biologiques, environnementaux et occupationnels
Institut national de santé publique du Québec

Anne Vézina, M. Sc.
Direction des risques biologiques, environnementaux et occupationnels
Institut national de santé publique du Québec

Jacques Boisvert, Ph. D.
Département de chimie-biologie
Université du Québec à Trois-Rivières

Daniel Gingras, Ph. D.
Direction des risques biologiques, environnementaux et occupationnels
Institut national de santé publique du Québec

AVEC LA COLLABORATION DE

Onil Samuel, B. Sc.
Direction de la toxicologie humaine
Institut national de santé publique du Québec

Pierre Chevalier, Ph. D.
Direction des risques biologiques, environnementaux et occupationnels
Institut national de santé publique du Québec

Karine Chaussé, M. Env.
Direction des risques biologiques, environnementaux et occupationnels
Institut national de santé publique du Québec

AVEC LA COLLABORATION DE (SUITE)

Michel Cantin, B. Sc.
Société de protection des forêts contre les insectes et maladies

Marie-Pierre Thibeault, M. Env.
Société de protection des forêts contre les insectes et maladies

Yves Garant, M. Sc.
Société de protection des forêts contre les insectes et maladies

Éric T. Lacroix, M. Sc.
Société de protection des forêts contre les insectes et maladies

RELECTEURS

Jean-Pierre Bourassa, D. Sc.
Département de chimie-biologie
Université du Québec à Trois-Rivières

Daniel Bolduc, M. Env.
Direction des risques biologiques, environnementaux et occupationnels
Institut national de santé publique du Québec

SECRÉTARIAT

Denise Mercier
Sylvie Muller
Direction des risques biologiques, environnementaux et occupationnels
Institut national de santé publique du Québec

Cette étude a été réalisée grâce au soutien financier du ministère de la Santé et des Services sociaux.

Ce document est disponible intégralement en format électronique (PDF) sur le site Web de l'Institut national de santé publique du Québec au : http://www.inspq.qc.ca.

DÉPÔT LÉGAL – 4e TRIMESTRE 2007
BIBLIOTHÈQUE ET ARCHIVES NATIONALES DU QUÉBEC
BIBLIOTHÈQUE ET ARCHIVES CANADA
ISBN 10 : 2-550-48132-1 (VERSION IMPRIMÉE)
ISBN 13 : 978-2-550-48132-4 (VERSION IMPRIMÉE)
ISBN 10 : 2-550-48133-X (PDF)
ISBN 13 : 78-2-550-48133-1 (PDF)

AVANT-PROPOS

En septembre 2003, le ministère de la Santé et des Services sociaux (MSSS) confiait à l'Institut national de santé publique du Québec (INSPQ) le mandat de réaliser une étude d'impact sur l'environnement du programme de pulvérisations aériennes d'insecticides pour contrer le virus du Nil occidental (VNO) en cas d'épidémie. Cette étude d'impact était nécessaire en raison du fait que le Plan d'intervention gouvernemental de protection de la santé publique contre le VNO prévoyait des applications aériennes d'insecticides qui pourraient être réalisées sur une superficie de plus de 600 hectares (ha). Comme la *Loi sur la qualité de l'environnement* (L.R.Q., c. Q-2) assujettit tout programme ou projet de pulvérisation aérienne de pesticides sur une superficie de 600 ha ou plus à la procédure québécoise d'évaluation et d'examen des impacts, l'étude a été amorcée dans ce contexte.

Au cours de la réalisation de l'étude d'impact, plusieurs éléments sont venus influencer son contenu. En effet, l'approche québécoise en matière de VNO a été influencée par l'évolution des connaissances scientifiques de même que par l'expérience acquise au Québec et dans l'ensemble de l'Amérique du Nord. Des rencontres de discussion ont aussi permis de documenter les préoccupations et les perceptions de la population au regard de la problématique du VNO et des pulvérisations aériennes d'insecticides.

Considérant ces nouvelles informations, le MSSS a adopté une nouvelle approche. Malgré le fait que celle-ci ne soit plus assujettie à la procédure québécoise d'évaluation et d'examen des impacts, le MSSS a tout de même choisi de compléter les travaux amorcés sous forme d'une étude d'impact stratégique qui porte désormais sur l'ensemble du Plan d'intervention gouvernemental de protection de la santé publique contre le VNO. Les travaux réalisés dans le cadre de l'étude d'impact initiale sont publiés sous forme de rapports sectoriels annexés au rapport principal en vue d'y apporter un éclairage scientifique.

Comme les travaux menés dans le cadre de l'étude d'impact étaient bien amorcés au moment de sa réorientation à l'été 2005, le lecteur est invité à considérer le changement d'orientation de l'étude lorsqu'il prendra connaissance du contenu des rapports sectoriels.

SOMMAIRE

Les mesures de prévention et de lutte anti-vectorielle qui permettent d'assurer la protection de la santé publique contre le VNO sont nombreuses et diversifiées. Le présent rapport présente les principaux éléments qui composent ces mesures de prévention et de protection à savoir la protection personnelle, l'aménagement d'habitats favorables à la reproduction des moustiques, les alternatives biologiques de même que les approches de traitements à l'aide de larvicides et d'adulticides.

Au moment de la rédaction du présent document l'Agence de réglementation de la lutte antiparasitaire (ARLA) autorise l'utilisation de cinq ingrédients actifs pouvant être appliqués chez l'humain comme moyen de protection personnelle. Il s'agit de l'huile de soya, de l'huile de lavande, de l'huile de citronnelle, du p-menthane-3,8-diol et du DEET. Ces ingrédients actifs se retrouvent dans une multitude de produits insectifuges qui sont disponibles sur le marché canadien et conçus pour prévenir les piqures d'insectes chez les humains et les animaux. La durée de protection varie grandement selon l'ingrédient actif qui est utilisé. Ces produits sont jugés sécuritaires lorsqu'ils sont utilisés conformément aux instructions qui figurent sur l'étiquette.

En ce qui concerne les insecticides domestiques disponibles sur le marché, leur efficacité dans le contrôle des moustiques s'avère généralement plutôt restreinte. En effet, l'efficacité de plusieurs produits destinés pour usage extérieur peut se voir limitée notamment par la présence de vents légers (ex. : aérosols manuels, brumisateurs, spirales, chandelles à la citronnelle). Quant aux produits destinés pour un usage intérieur (ex. : aérosols manuels, aérosols avec pulvérisateurs à piles), ils peuvent s'avérer efficaces pour se débarrasser des insectes piqueurs. Toutefois, la prudence est de rigueur afin de s'exposer le moins possible aux vapeurs d'insecticides émises.

Toujours dans le cadre des mesures de protection personnelle, une recension des alternatives technologiques (c'est-à-dire les procédés, méthodes et appareils qui fournissent une protection contre les piqures de moustiques ou qui permettent de réduire leurs populations par leur capture, leur destruction ou par le fait de les éloigner des humains) a été complétée. Des alternatives étudiées dans ce chapitre, les pièges attractifs apparaissent comme étant les plus intéressants en raison de leur efficacité pour capturer des moustiques et de leur innocuité pour l'environnement et la santé humaine. Cependant, il a été démontré qu'une personne attirait beaucoup plus de moustiques que ces pièges. De plus, les coûts d'achat, d'utilisation et d'entretien de ces appareils laissent supposer que peu de gens s'en serviraient quotidiennement pour réduire les populations de moustiques autour de leur maison.

L'utilisation d'un chasse-moustiques (insectifuge), le port de vêtements longs et de couleurs claires, et la prudence lors des activités extérieures à l'aube et au crépuscule sont au nombre des mesures de protection personnelle relatives aux habitudes de vie. Malgré le fait qu'elles soient relativement simples et accessibles à tous, peu de gens les appliquent.

L'aménagement et l'entretien du milieu environnant afin d'éliminer les gites de reproduction des moustiques sont également recommandés par les autorités de santé publique. À la lueur des informations disponibles, il semble qu'en général ces stratégies, lorsque bien utilisées, démontrent un certain degré de protection contre les piqures de moustiques.

Les recherches effectuées en matière d'aménagement des habitats favorables à la reproduction des moustiques vecteurs du VNO ont permis de mettre en évidence que les méthodes modifiant physiquement les gites naturels ne s'appliquent pas au contexte québécois en raison des conditions climatiques et de la législation stricte entourant la protection et la conservation des écosystèmes aquatiques. L'aménagement physique des milieux artificiels les plus propices à la reproduction des espèces de moustiques vecteurs du VNO au Québec, en particulier lorsque ces gites artificiels sont situés à proximité des habitations humaines, peut être un moyen complémentaire aux autres mesures d'intervention pour limiter le risque de transmission du VNO. C'est le cas notamment des aménagements pouvant être apportés aux réseaux d'égout pluviaux et aux puisards, aux sites de dépôt à neige et aux sites de dépôt de pneus usagés de manière à limiter l'accumulation d'eau stagnante. Des travaux de recherche devraient être effectués en ce sens. Pour ce qui est de l'aménagement des sites d'entreposage de pneus hors d'usage, la mise en ballots des pneus hors d'usage a déjà démontré son efficacité.

La recherche montre que l'usage de prédateurs naturels est peu pertinent pour le contrôle des moustiques. L'efficacité des oiseaux insectivores et des chauves-souris est limitée en raison de leurs habitudes alimentaires et les conditions québécoises ne sont pas propices à l'utilisation de poissons prédateurs, d'autant plus que leur introduction affecterait la biodiversité des écosystèmes aquatiques. L'efficacité des insectes aquatiques prédateurs n'a par ailleurs jamais été démontrée. Différentes espèces de parasites pourraient être efficaces contre les moustiques aux stades larvaire ou adulte, mais plusieurs paramètres contraignent leur utilisation. Des efforts importants de recherche ont aussi été déployés dans les dernières années afin de trouver des microorganismes pathogènes en vue de contrôler les moustiques. Certains champignons présenteraient un potentiel comme agents de lutte biologique pour les moustiques. Selon la littérature consultée, aucun virus ne semble cependant être efficace pour le contrôle des moustiques. Aucun vaccin n'est présentement disponible pour prévenir les infections au VNO chez les humains, mais des recherches portant sur les anticorps monoclonaux semblent prometteuses.

Parmi les insecticides actuellement homologués au Canada pour le contrôle des larves de moustiques vecteurs, le *Bacillus thuringiensis* var*. israelensis et* le *Bacillus sphaericus* (deux larvicides biologiques) et le méthoprène (un larvicide chimique), s'avèrent ceux étant les plus efficaces et présentant la meilleure innocuité pour l'environnement et la santé humaine lorsqu'ils sont utilisés selon les recommandations du fabricant. Bien que le *Bacillus sphaericus* apparaisse à première vue comme étant un larvicide de choix dans la prévention de la transmission du VNO, des essais terrains récents ont révélé que son efficacité à long terme ne semble pas concluante dans les conditions climatiques québécoises.

Aucun traitement avec des adulticides n'a été utilisé jusqu'à maintenant en vue de lutter contre le VNO en territoire québécois. Toutefois, en tenant compte de la possible nécessité de recourir à des adulticides en cas d'épidémie, un portrait des différents produit disponibles a été dressé pour mieux connaître leur efficacité de même que leurs impacts potentiels sur la santé et l'environnement. Parmi les insecticides actuellement homologués au Canada pour le contrôle des moustiques adultes présentant la meilleure innocuité pour l'environnement et la santé humaine, lorsqu'ils sont utilisés conformément à l'étiquette, seul le malathion peut être appliqué par voie aérienne. Comme la resméthrine fait partie des produits disponibles pour des applications aériennes aux États-Unis et que plusieurs experts lui reconnaissent de nombreux avantages, elle a aussi été retenue afin de disposer des données requises pour une éventuelle demande d'homologation. Ceux homologués pour l'application par voie terrestre contiennent tous du malathion, des pyréthrines synergisées ou de la *d-trans*-alléthrine synergisée. La perméthrine est appliquée quant à elle en traitement barrière. Lorsque des traitements à l'aide de larvicides s'avèrent insuffisants et que le contrôle des moustiques adultes est considéré, les pulvérisations à ultra bas volume seraient toutefois favorisées. Tous les adulticides étudiés sont caractérisés par une action non systémique. Ils sont notamment toxiques pour les poissons et les invertébrés aquatiques ainsi que pour plusieurs insectes utiles dont les abeilles. De façon générale, lorsqu'ils sont appliqués selon les recommandations du fabricant, ils s'avèrent peu toxiques pour l'humain.

TABLE DES MATIÈRES

LISTE DES TABLEAUX

LISTE DES FIGURES

LISTE DES SIGLES, ABRÉVIATIONS ET ACRONYMES

SIGLE, ABRÉVIATION OU ACRONYME	SIGNIFICATION
Ae.	*Aedes*
AMCA	*American Mosquito Control Association*
An.	*Anopheles*
ARLA	Agence de réglementation de la lutte antiparasitaire
Bsph	*Bacillus sphaericus*
Bt	*Bacillus thuringiensis*
Bti	*Bacillus thuringiensis* var*. israelensis*
CAPQ	Centre antipoison du Québec
CARC	*Cancer Assessment Review Committee*
CAS	*Chemical Abstracts Service*
CDC	*Centers for Disease Control*
CEPA	*California Environmental Protection Agency*
CL	Concentration létale
CMM	Cote moyenne maximale
Cx	*Culex*
DEET	N,N-diéthyl-m-toluamide ou N,N-diéthyl-3-méthylbenzamide
DL	Dose létale
FAO	*Food and Agriculture Organization of the United Nations*
HSDB	*Hazardous Substances Databank*
IARC	*International Agency for Research on Cancer*
ICSC	*International Chemical Safety Cards*
IMI	Indice maximal d'irritation
INSPQ	Institut national de santé publique du Québec
IPCS	*International Programme on Chemical Safety*
IIP	Indice d'irritation primaire
IRIS	*Integrated Risk Information System*
MDDEP	Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs (autrefois MENV)
MENV	Ministère de l'Environnement du Québec
MGK-264	N-octyl bicycloheptène dicarboximide
MMWR	*Morbidity and Mortality Weekly Report*
MSSS	Ministère de la Santé et des Services sociaux
MTA	Maladies transmises par des arthropodes
MTQ	Ministère des Transports du Québec

LISTE DES SIGLES, ABRÉVIATIONS ET ACRONYMES (SUITE)

SIGLE, ABREVIATION OU ACRONYME	SIGNIFICATION
NPTN	*National Pesticide Telecommunications Network*
NYCDOH	*New York City Department of Health*
Oc.	*Ochlerotatus*
OMS	Organisation mondiale de la Santé
PBO	*Piperonyl butoxide* (Butoxyde de pipéronyle)
RTECS	*Registry of Toxic Effects of Chemical Substances*
SNC	Système nerveux central
SOPFIM	Société de protection des forêts contre les insectes et maladies
TEAAM	*Targeted Environmental Action Against Mosquitoes*
UBV	Ultra bas volume (*ULV*, *Ultra low volume*)
UFC/L	Unité formant colonie par litre d'eau
US EPA	United States Environmental Protection Agency
UV	Ultraviolet
VNO	Virus du Nil occidental
WHO	*World Health Organization*

1 INTRODUCTION

L'introduction du virus du Nil occidental (VNO) en Amérique du Nord a nécessité l'adoption et la mise en œuvre par le gouvernement québécois d'un plan d'intervention pour protéger la santé de la population. Ce plan d'intervention, mis à jour annuellement, comporte des mesures de prévention et de protection qui sont modulées en fonction du niveau de risque observé.

Dans le contexte de réalisation d'une étude d'impact stratégique du Plan d'intervention gouvernemental de protection de la santé publique contre le VNO, il est apparu des plus opportun de dresser un portrait de l'ensemble des mesures de prévention et de protection possibles en vue de protéger la population contre le VNO. Pour ce faire, un effort a été déployé pour regarder ce qui pouvait se faire comme moyens de contrôle vectoriel ailleurs sur le continent américain, en Europe et en Afrique en vue de lutter contre le VNO ou d'autres maladies transmises par des moustiques. À partir de ces données, les autorités de santé publique pourront retenir dans leur stratégie les mesures les plus avantageuses notamment en termes d'efficacité et d'impacts sur l'environnement et la santé humaine.

Le document aborde donc dans un premier temps les différentes mesures de protection personnelle auxquelles la population pourrait recourir. La section suivante traite des aménagements qui pourraient être réalisés dans les habitats qui sont favorables au développement des moustiques et qui permettent de contrôler leur abondance. Le quatrième volet du document décrit pour sa part les alternatives biologiques que représentent le recours aux prédateurs de moustiques et la vaccination. Les chapitres cinq et six du rapport présentent les larvicides et les adulticides qui pourraient être employés pour limiter la transmission du VNO en fonction de l'évolution de la situation.

2 MOYENS DE PROTECTION PERSONNELLE

Afin de prévenir les piqures de moustiques et par le fait même de minimiser le risque d'être infecté par le VNO, plusieurs stratégies de protection personnelle sont généralement recommandées par les autorités de santé publique. En prévision d'une éventuelle introduction du VNO en territoire québécois, le ministère de la Santé et des Services sociaux (MSSS) a demandé à l'Institut national de santé publique du Québec (INSPQ) de réaliser une évaluation des risques pour la santé humaine associés aux moyens de prévention et de contrôle de la transmission du VNO. Parmi les travaux réalisés, l'INSPQ a publié en 2002 un document intitulé *Efficacité et risques des moyens de protection personnelle contre la transmission du virus du Nil occidental* (Sanfaçon *et al.*, 2002) auquel le lecteur intéressé pourra s'y référer. Dans le cadre de la réalisation de l'étude d'impact stratégique, les données sur les insectifuges personnels, les insecticides domestiques, les alternatives technologiques, les habitudes de vie ainsi que l'entretien et l'aménagement du milieu environnant ont été mises à jour et sont présentées dans les sections suivantes.

2.1 INSECTIFUGES PERSONNELS

Par définition, un insectifuge (chasse-moustiques) est une substance qui, appliquée sur la peau, imprégnant les vêtements ou ingérée et éliminée par la sueur, éloigne provisoirement les insectes sans cependant les détruire (Grand dictionnaire terminologique, 2005). L'insectifuge provoque chez l'insecte une altération de la conduite de repérage de l'hôte, aboutissant à une déviation du vol, l'éloignant de sa cible potentielle (Combemale, 2001), tandis qu'un insecticide tue l'insecte après le contact avec ce dernier.

Il existe deux modes d'action pour les insectifuges personnels contre les insectes piqueurs. Il s'agit de l'effet barrière et de l'effet répulsif. L'effet barrière est créé par la simple application d'un produit sur la peau. En effet, la présence d'une couche huileuse sur le derme ne permettrait pas à un insecte piqueur de s'y poser (Grondin, 1998 [tiré de Sanfaçon *et al.*, 2002]). Quant à l'effet répulsif, il serait créé *grosso modo* par l'odeur repoussante d'un insectifuge pour certaines espèces d'insectes ou par une perturbation des récepteurs chimiques logés sur leurs antennes, lesquelles leur permettent normalement de repérer leurs proies (Barnard, 2000; United States Environmental Protection Agency, 1999); Grondin 1998 [tiré de Sanfaçon *et al.*, 2002]).

Sur le marché canadien, il existe aujourd'hui une multitude de produits insectifuges conçus pour prévenir les piqures d'insectes chez les humains et chez les animaux. Ces produits insectifuges contiennent différents ingrédients actifs qui sont autorisés par l'Agence de réglementation de la lutte antiparasitaire (ARLA) en vertu de la *Loi sur les produits antiparasitaires*[1]. Au moment de la mise à jour des données sur les insectifuges à l'automne 2004, cinq ingrédients actifs pouvant être appliqués chez l'humain étaient

[1] En vertu de cette loi, une approbation relative à l'efficacité et l'innocuité d'un produit est émise par l'ARLA en lui octroyant un numéro d'homologation.

homologués, soit l'huile de soya, l'huile de lavande, l'huile de citronnelle, le p-menthane-3,8-diol et le DEET (N,N-diéthyl-m-toluamide ou N,N-diéthyl-3-méthylbenzamide) (Agence de réglementation de la lutte antiparasitaire, 2004b).

Cette section du rapport présente une description sommaire des ingrédients actifs homologués par l'ARLA, incluant une mise à jour des données toxicologiques publiées jusqu'en 2004. Bien que l'huile de soya soit homologuée, elle n'est cependant pas abordée du fait qu'elle soit peu disponible. En effet, peu de magasins de détails la vendent (Agence de santé publique du Canada, 2005).

2.1.1 Huile de lavande

Peu de données relatives aux insectifuges personnels à base d'huile de lavande sont disponibles. Sur le marché canadien, un seul produit est homologué par l'ARLA (Agence de réglementation de la lutte antiparasitaire, 2004d) (tableau 2.1). Par ailleurs, à la suite de l'amorce du *Programme de réévaluation de l'ARLA*[2], les titulaires de l'homologation de cet insectifuge à base d'huile de lavande ont décidé de retirer leur demande d'homologation. L'ARLA a donc retiré ce produit du *Programme de réévaluation* et a établi un calendrier d'abandon graduel jusqu'au 31 mars 2007. Ce produit pourra donc être utilisé jusqu'à cette date selon le mode d'emploi inscrit sur l'étiquette (Agence de réglementation de la lutte antiparasitaire, 2004c).

Tableau 2.1 Produit à base d'huile de lavande homologué au Canada

No d'homologation	Nom du produit	Concentration du produit actif (%)
9930	Fly Screen	6

Source : ARLA, 2004d

2.1.1.1 Propriétés physico-chimiques

L'huile de lavande est extraite de quatre principales espèces végétales, soit *Lavandula latifolia*, *Lavandula angustifolia*, *Lavandula stoechas* et *Lavandula x intermedia* (Cavanagh et Wilkinson, 2002). Principales sources de l'odeur caractéristique de l'huile de lavande, des acétates linalyliques sont présentes en différentes concentrations selon l'origine de la plante (30-60 % au Sud de la France, 8-18 % en Angleterre, 25 % au Cachemire). L'huile de lavande contient également 30-40 % de géraniol et d'esters (linalol, lavandulol, nérol, cinéol, caryophyllène, coumarine, limonène, bétaocimène, furfural, cétone amylique éthylique, thujone et pinocamphone), ainsi que du camphre à des concentrations variables, selon l'espèce végétale employée. Par exemple, *L. angustifolia* est utilisée dans l'industrie des parfums et des cosmétiques, alors que les espèces à forte teneur en camphre (ex. : *L. stoechas*) sont utilisées notamment en tant qu'insectifuges (Cavanagh et Wilkinson, 2002;

[2] Le *Programme de réévaluation de l'ARLA* (directive d'homologation DIR2001-03) indique que l'ARLA avait l'intention de réévaluer l'acceptabilité continue de 405 matières actives et de leurs préparations commerciales connexes en vertu de l'article 19 du *Règlement sur les produits antiparasitaires* (Agence de réglementation de la lutte antiparasitaire, 2004c).

Budaran *et al.*, 1996; Duke 1985 [tirés de Sanfaçon *et al.*, 2002]). L'huile de lavande est soluble dans l'alcool. Son numéro du CAS[3] est le 8000-28-0.

2.1.1.2 Mode d'action

Aucun renseignement en ce qui concerne le mode d'action propre à l'insectifuge à base d'huile de lavande n'a pu être retracé dans la littérature scientifique.

2.1.1.3 Caractéristiques toxicologiques

- Toxicité aigüe

L'huile de lavande pourrait théoriquement provoquer, par contact direct, des irritations cutanées et oculaires (Registry of Toxic Effects of Chemical Substances, 2003). À la suite d'une ingestion, elle pourrait également occasionner divers symptômes tels que nausées, vomissements, céphalées et étourdissements (Haddad *et al.*, 1998). Les doses létales[4] de l'huile de lavande observées chez certaines espèces animales selon les voies d'exposition ont été revues (tableau 2.2).

Tableau 2.2 Doses létales de l'huile de lavande mesurées chez des animaux

Espèce animale	Dose létale (DL_{50}) par voie orale	Dose létale (DL_{50}) par injection intrapéritonéale	Dose létale (DL_{50}) par application cutanée
Rat	170 mg/kg	540 mg/kg	–
Souris	–	640 mg/kg	–
Lapin	–	–	> 5 g/kg
Cochon de Guinée	–	–	> 5 g/kg

Tiré de RTECS®, (Registry of Toxic Effects of Chemical Substances, 2003).

- Toxicité chronique

Aucune donnée relative à la cancérogénicité, à la mutagénicité, à la neurotoxicité, à la tératogénicité ainsi qu'aux effets possibles sur la reproduction de l'huile de lavande n'a été retracée dans la littérature médicale (par une recherche sur PubMed), ni dans les fichiers de l'ARLA.

[3] Situé en Ohio (USA), le *Chemical Abstracts Service* (CAS) a mis sur pied une banque de données sur plus de 32 millions de produits chimiques. Afin d'être compilés dans cette banque, ces produits ont reçu à cet effet un numéro d'enregistrement.

[4] Une mesure de la toxicité aigüe d'une substance est la dose létale cinquante (DL_{50}) (concentration causant le décès chez 50 % des sujets). Les toxicologues considèrent qu'il y a toxicité sévère quand la DL_{50} est faible, et qu'il y a toxicité légère quand les valeurs sont élevées. Cependant, la DL_{50} ne peut traduire des effets à long terme tels que la cancérogénicité, les effets sur la reproduction ou le développement. Le terme de toxicité chronique est alors employé.

2.1.1.4 Pharmacocinétique

Aucun renseignement n'a été trouvé en ce qui a trait à la pharmacocinétique de l'huile de lavande.

2.1.1.5 Cas d'intoxication chez les humains

Un seul cas d'intoxication accidentelle chez les humains a été retracé dans la littérature médicale. En utilisant de l'huile de lavande lors d'un massage, une étudiante en aromathérapie dans la vingtaine a subi une réaction de type allergique. Elle a d'abord ressenti des picotements aux mains, qui sont rapidement devenues enflées. Des rougeurs aux bras et à la gorge se sont manifestées et elle avait le souffle court, moins de trois minutes suivant l'exposition. Après s'être lavée les mains, elle s'est rendue à l'hôpital. À ce moment, elle souffrait d'hypertension. Des antihistaminiques lui ont alors été administrés (Maddocks-Jennings, 2004).

2.1.1.6 Durée de protection

Aucune nouvelle donnée concernant la durée de protection des insectifuges à base d'huile de lavande contre les insectes piqueurs n'a été recensée. Il semblerait que le seul produit homologué au Canada protège contre les piqures de moustiques pendant 30 minutes ou moins (Agence de réglementation de la lutte antiparasitaire, 2004b; Santé Canada, 2000). Il est à noter que la durée de protection d'un insectifuge quel qu'il soit peut varier considérablement en fonction de différents paramètres tels que la température et le degré d'humidité de l'air ambiant ainsi que le degré d'activité physique et la physionomie des utilisateurs (Barnard, 2000; Agence de réglementation de la lutte antiparasitaire, 1999; Qiu *et al*., 1998).

2.1.2 Huile de citronnelle

Les renseignements relatifs aux insectifuges personnels à base d'huile de citronnelle sont également plutôt limités. Dans la gamme des produits insectifuges, elle se retrouve sous différentes formes (bougies, lotions pour le corps, gels, aérosols, etc.). Au niveau des produits homologués par l'ARLA (Agence de réglementation de la lutte antiparasitaire, 2004e), onze peuvent être utilisés contre les moustiques (tableau 2.3). Leur concentration en ingrédient actif varie entre 2,55 et 15 %.

En septembre 2004, l'ARLA a proposé de mettre graduellement fin à l'homologation des insectifuges personnels renfermant de l'huile de citronnelle et des composés apparentés appliqués sur la peau (Agence de réglementation de la lutte antiparasitaire, 2004e). En effet, à la suite de la réévaluation de l'huile de citronnelle et des composés apparentés pour utilisation comme insectifuge personnel, l'ARLA n'a pas pu conclure que les risques pour la santé humaine associés à l'utilisation de ces insectifuges demeuraient acceptables. La préoccupation provenait du méthyleugénol, un cancérigène probable pour l'être humain qui est présent dans l'huile de citronnelle naturelle (Agence de réglementation de la lutte antiparasitaire, 2004e). L'*United States Environmental Protection Agency* (US EPA) conserve toujours l'huile de citronnelle sur sa liste de répulsifs approuvés.

Dans le cadre du processus de réévaluation, les parties intéressées ont pu fournir des renseignements supplémentaires et des commentaires à l'ARLA afin qu'elle les étudie avant de rendre sa décision finale (Agence de réglementation de la lutte antiparasitaire, 2005a). L'ARLA n'a reçu aucun renseignement additionnel qui aurait pu aider à préciser l'évaluation des risques sanitaires et aucun titulaire de l'homologation ne s'est engagé à générer les données exigées.

Tableau 2.3 Produits à base d'huile de citronnelle homologués au Canada

No d'homologation	Nom du produit	Concentration (%)
21424	Natrapel citronella insect repellent lotion with aloe	10
21425	Natrapel insect repellent spray with aloe	10
22427	Natrapel Eco-Spray	10
24444.00	Buzz Away insect repellent 12 towelettes	5
24537.00	Mckirdy's original fly repellent repalfly	15
25446.00	Druide® Lotion chasse-insectes	10
25447.00	Druide® Lait chasse-insectes	10
25517	Walkabout personal insect repellent	2,55
25797	Citrobug insect repellent oil[1]	3
27188	Natrapel citronella insect repellent roll-on	10
27456	BFZee™ mosquito & black fly repellent wipes	10

Tiré de l'ARLA (Agence de réglementation de la lutte antiparasitaire, 2004d).

1 Il s'agit d'un mélange d'huiles naturelles composé d'huiles de citronnelle, d'agrumes, d'eucalyptus, de pin, de géranium et de camphre. La concentration de 3 % indiquée correspond à celle du mélange total.

L'ARLA a par ailleurs reçu des commentaires relativement à la sécurité et à l'innocuité du produit. Afin de résoudre les différences entre les résultats de l'évaluation des risques menée par l'ARLA et l'innocuité apparente de l'huile de citronnelle, l'ARLA a fait appel à un comité d'experts scientifiques indépendants pour examiner les raisons justifiant la décision proposée dans la *Réévaluation de l'huile de citronnelle et des composés apparentés pour l'utilisation comme insectifuge personnel* avant de rendre sa décision finale (Agence de réglementation de la lutte antiparasitaire, 2005a). Cet examen permettra de s'assurer que l'ARLA a exploré toutes les options scientifiques possibles avant de rendre sa décision. Les insectifuges à base d'huile de citronnelle resteront sur le marché durant la période d'examen. Les remarques et les recommandations du comité d'experts scientifiques indépendants n'ont toujours pas été émises.

2.1.2.1 Propriétés physico-chimiques

Les insectifuges à base d'huile de citronnelle peuvent contenir plusieurs substances actives différentes (Agence de réglementation de la lutte antiparasitaire, 2004e). Ces substances actives forment des mélanges complexes composés principalement de terpènes apparentés du point de vue chimique et structurel, soit l'huile de citronnelle naturelle, l'huile de

citronnelle synthétique, le citronellal et des mélanges d'huiles naturelles qui contiennent de l'huile de citronnelle, ses composés ou des substances actives de même type (Agence de réglementation de la lutte antiparasitaire, 2004e).

Les deux principales variétés commerciales d'huile de citronnelle disponibles sur le marché sont le type « Ceylan » et le type « Java ». Le numéro CAS de l'huile de citronnelle est le 8000-29-1.

2.1.2.2 Mode d'action

Tel que rapporté dans Sanfaçon *et al*. (2002), l'odeur caractéristique de l'huile de citronnelle aurait un véritable effet répulsif sur les insectes piqueurs.

2.1.2.3 Caractéristiques toxicologiques

- Toxicité aigüe

La mise à jour des données n'a pas révélé de nouveaux résultats de tests de toxicité effectués sur des animaux de laboratoire. Selon le classement déterminé par l'United States Environmental Protection Agency (US EPA)[5], l'huile de citronnelle s'avère peu ou pas toxique (United States Environmental Protection Agency, 1999).

- Toxicité subchronique et chronique

Aucune information nouvelle sur la toxicité subchronique et sur la toxicité chronique n'a été recensée dans la littérature médicale (recherche sur PubMed), ni dans les fichiers de l'ARLA. Se basant sur des études réalisées sur des animaux, l'ARLA indique que les produits à base de citronnelle pourraient contribuer à sensibiliser la peau et, conséquemment, occasionner des réactions allergiques chez certaines personnes (Agence de réglementation de la lutte antiparasitaire, 2004b).

2.1.2.4 Pharmacocinétique

Étant donné qu'aucune référence spécifique à l'huile de citronnelle n'a été recensée, sa pharmacocinétique peut se référer à celle des huiles essentielles. En général, la plupart des huiles essentielles sont bien absorbées par les muqueuses et la peau et sont ensuite excrétées par les poumons, les reins, les selles et la sudation (Centre antipoison du Québec, 2004).

[5] L'US EPA a défini quatre catégories de toxicité pour les pesticides :
I : très toxique, II : relativement toxique, III : légèrement toxique et IV : très peu toxique.

2.1.2.5 Cas d'intoxication chez les humains

Entre 2000 et 2003, le Centre antipoison du Québec (CAPQ) a enregistré 130 cas d'intoxication liés aux produits à base d'huile de citronnelle. Parmi ceux-ci, 65,4 % étaient des cas répertoriés chez des enfants de 0 à 5 ans. Plus de 70 % étaient des intoxications par voie orale. La proportion d'intoxications pour le sexe masculin et féminin était respectivement de 69 et 61 cas. Dans la majorité des cas (79 %), la toxicité était de type local. De l'ensemble des cas répertoriés d'intoxication aux produits à base d'huile de citronnelle, 83 % étaient des pesticides et 15 % des produits domestiques.

2.1.2.6 Durée de protection

En plus des résultats rapportés dans Sanfaçon *et al.* (2002), d'autres études ont révélé que l'espèce du moustique, ainsi que la densité d'insectes présents dans l'environnement immédiat peuvent également jouer un rôle important sur l'efficacité d'un insectifuge (Fradin et Day, 2002). Il faut toutefois être prudent lorsqu'il s'agit de comparer des taux d'efficacité de différents produits et même le taux d'efficacité d'un produit. Les tests d'efficacité des insectifuges peuvent être effectués en laboratoire et/ou sur le terrain. En laboratoire, des espèces de moustiques qui sont en élevage depuis des années sont utilisées. Ces moustiques d'élevage permettent de comparer plus facilement les résultats d'un laboratoire à un autre et d'avoir une bonne idée sur l'efficacité d'un produit. Cependant, il est connu que les moustiques élevés en laboratoire, sont très sensibles à plusieurs produits. À partir de ce type d'études, il a été déterminé que l'efficacité d'un répulsif variait beaucoup d'une espèce de moustique à une autre et même entre différentes sous-espèces. Pour ce qui est des tests effectués sur le terrain avec différents insectifuges (pour fins de comparaison) et des populations naturelles de moustiques présentes au moment des tests, leurs résultats sont plus difficiles à comparer, mais les valeurs obtenues sont plus significatives en termes de protection réelle pour l'usager. C'est une des raisons pour laquelle l'ARLA recommande des tests sur le terrain dans le processus d'homologation.

Tawatsin *et al.* (2001) ont évalué l'efficacité de l'huile de citronnelle contre trois espèces de moustiques, soit *Aedes aegypti, Anopheles dirus* et *Culex quinquefasciatus*. À la suite de tests effectués en laboratoire, ces chercheurs ont noté que l'huile de citronnelle protégeait contre les piqures de moustiques pour une période variant entre six et huit heures pour les trois espèces de moustiques. Le produit utilisé contenait 25 % d'huile de citronnelle extraite de l'espèce végétale *Cymbopogan winterianus* et 5 % de vanilline. La durée d'efficacité de l'huile de citronnelle sans vanilline pour *Ae. aegypti*, *An. dirus* et *Cx quinquefasciatus* était respectivement de trois heures, de moins de quatre heures et de huit heures (Tawatsin *et al.*, 2001).

Fradin et Day (2002) ont réalisé une étude comparative sur l'efficacité de plusieurs insectifuges contre les piqures de moustiques. Parmi les produits testés se trouvaient deux des produits à base de citronnelle homologués au Canada, soit le Buzz Away® et le Natrapel®, contenant respectivement 5 % et 10 % d'huile de citronnelle. Pour ces deux insectifuges, la durée de protection contre les piqures de moustiques était inférieure à 20 minutes (Fradin et Day, 2002). Barnard et Xue (2004) ont effectué une étude en

laboratoire sur l'efficacité de plusieurs produits insectifuges contre trois espèces de moustiques, soit *Ae. albopictus*, *Cx nigripalpus* et *Ochlerotatus triseriatus*. Parmi les produits testés se trouve le Natrapel®, un produit à base d'huile de citronnelle (10 %) homologué au Canada. La durée d'efficacité de cet insectifuge dépendait de l'espèce de moustiques à repousser. Elle était de 30 minutes contre *Oc. triseriatus*, de 1,3 heures contre *Ae. albopictus* et de 5,2 heures contre *Cx nigripalpus* (Barnard et Xue, 2004).

2.1.3 p-menthane-3,8-diol

Étant donné que le p-menthane-3,8-diol a été mis sur le marché depuis quelques années aux États-Unis et tout récemment au Canada les renseignements relatifs aux insectifuges personnels à base de cet ingrédient actif sont assez rares.

Le p-menthane-3,8-diol est un analogue synthétique d'un composé dérivé de l'eucalyptus à odeur de citronnelle (*Eucalyptus citriodora*) (Agence de réglementation de la lutte antiparasitaire, 2002b). Sur le marché canadien, un seul insectifuge à base de p-menthane-3,8-diol (tableau 2.4) est homologué par l'ARLA (Agence de réglementation de la lutte antiparasitaire, 2004d).

Tableau 2.4 Produit à base de p-menthane-3,8-diol homologué au Canada

No d'homologation	Nom du produit	Concentration du produit actif (%)
27194	OFF! Botanicals Lotion Insect Repellent 1	10

Tiré de l'ARLA (Agence de réglementation de la lutte antiparasitaire, 2004d).

2.1.3.1 Propriétés physico-chimiques

Le p-menthane-3,8-diol est un métabolite du menthol. Il est utilisé comme additif alimentaire ainsi que dans plusieurs préparations pharmaceutiques. Sa formule moléculaire est le $C_{10}H_{20}O_2$ et a comme autre nom chimique le 2-(2-hydroxy-2-méthyl)-5-méthyl-cyclohexanol. Il est très soluble dans l'eau et a une faible volatilité (Agence de réglementation de la lutte antiparasitaire, 2002b). Son numéro du CAS est le 42822-86-6.

2.1.3.2 Mode d'action

Aucune information sur le mode d'action propre au p-menthane-3,8-diol n'a été retracée dans la littérature scientifique. Cependant, selon le fabricant du produit, il peut chasser les insectes piqueurs en bloquant ou en interférant avec les sites récepteurs utilisés par le repérage de l'hôte (Agence de réglementation de la lutte antiparasitaire, 2002b).

2.1.3.3 Caractéristiques toxicologiques

- Toxicité aigüe

Évaluée auprès d'animaux de laboratoire, la toxicité aigüe du p-menthane-3,8-diol (98,3 %) et du produit commercial OFF! Botanicals Lotion Insect Repellent 1® (10 %) est présentée au tableau 2.5. Le p-menthane-3,8-diol (98,3 %) a une faible toxicité pour les voies d'exposition orale et cutanée. Il cause une irritation sévère aux yeux, mais légère à la peau (Agence de réglementation de la lutte antiparasitaire, 2002b). Des essais effectués sur des humains ou sur des rats ont démontré que ce produit n'était pas un sensibilisant pour la peau (United States Environmental Protection Agency, 2005; Agence de réglementation de la lutte antiparasitaire, 2002b). Puisque le p-menthane-3,8-diol est un solide à la température ambiante, l'inhalation n'est pas considérée comme une voie d'exposition selon l'ARLA (Agence de réglementation de la lutte antiparasitaire, 2002b).

Les mêmes essais de toxicité aigüe ont été effectués pour le produit commercial OFF! Botanicals Lotion Insect Repellent 1®, renfermant 10 % de p-menthane-3,8-diol dans sa formulation. Ils ont démontré une faible toxicité orale et cutanée pour ce produit, tout comme pour le produit technique (98,3 %). Ce dernier s'est avéré plus irritant que le produit commercial (10 %) en question. En effet, le OFF! Botanicals Lotion Insect Repellent ® est un irritant moyen et léger, respectivement pour les yeux et la peau. Tous les autres produits de formulation contenus dans la préparation commerciale apparaissent sur les listes des matières inertes 3, 4A ou 4B de l'US EPA, ou sur la liste canadienne des produits homologués, ou les deux, et il a été établi qu'ils ne suscitaient pas de préoccupation toxicologique (Agence de réglementation de la lutte antiparasitaire, 2002b).

Tableau 2.5 Toxicité aigüe du p-menthane-3,8-diol mesurée chez des animaux

Indice de toxicité	p-menthane-3,8-diol (concentration 98,3 %)		OFF! Botanicals Lotion Insect Repellent 1® (concentration 10,0 %)	
	Dose ou concentration	Espèce animale	Dose ou concentration	Espèce animale
DL_{50} orale	> 5 000 mg/kg	Rat[1]	> 5 000 mg/kg	Rat[1]
DL_{50} cutanée	> 5 000 mg/kg	Lapin[1]	> 5 000 mg/kg	Lapin[1]
DC_{50} inhalation	> 2,17 mg/l	Rat[2]	-	-
IIP[3] cutané	-	-	0,92	Lapin[1]
IMI[4]cutané	1,67	Lapin[a]	-	-
IMI yeux	51,00	Lapin[a]	6,67	Lapin[1]
CMM[5] cutané	1,06	Lapin[a]	0,83	Lapin[1]
CMM yeux	48,56	Lapin[a]	3,06	Lapin[1]

1 Tiré et adapté de l'ARLA (Agence de réglementation de la lutte antiparasitaire, 2002b)
2 Tiré et adapté de l'US EPA (United States Environmental Protection Agency, 2005)
3 IIP = Indice d'irritation primaire
4 IMI = Indice maximal d'irritation
5 CMM = Cote moyenne maximale

- Toxicités subchronique et chronique

Lors d'une étude d'immunotoxicité par voie cutanée, des souris femelles ont été exposées à des doses de 1 000 et 3 000 mg/kg/jour de p-menthane-3,8-diol (98,3 %), une fois par jour durant 28 jours. Même à la dose d'exposition la plus élevée (3 000 mg/kg/jour), cette étude n'a démontré aucune immunosuppression causée par ce produit (United States Environmental Protection Agency, 2005; Agence de réglementation de la lutte antiparasitaire, 2002b).

Lors d'une étude de toxicité par voie cutanée, les chercheurs ont exposé des rats pendant 90 jours à des doses de 1 000 et 3 000 mg/kg/jour de p-menthane-3,8-diol (98,3 %). Aucun point limite de toxicité n'a été révélé, cependant, une irritation cutanée a été observée pour ces deux doses sous forme d'érythèmes, d'escarres et de desquamation. À la suite d'une exposition à une dose de 3 000 mg/kg/jour, des lésions aux reins (néphropathie chronique et gouttes hyalines) vraisemblablement associées à la α-2μ-globuline ont été notées chez les rats mâles (United States Environmental Protection Agency, 2005; Agence de réglementation de la lutte antiparasitaire, 2002b).

Une étude de toxicité sur le développement a été effectuée sur des rats en exposant 25 femelles gestantes à des doses de 1 000 et 3 000 mg/kg/jour de p-menthane-3,8-diol (98,3 %) durant les jours 6 à 19 de la gestation. Lors de cette étude, les chercheurs n'ont noté aucun effet tératogène et ce, même à la dose d'exposition de 3 000 mg/kg/jour. La fœtotoxicité comportait une variation osseuse et une ossification réduite à la suite d'une

exposition à 3 000 mg/kg/jour. La dose sans effet observable de la toxicité maternelle a été établie à 1 000 mg/kg/jour en se basant sur la réduction du gain de masse corporelle et sur la consommation alimentaire au début de la période de gestation chez les animaux ayant reçu la dose de 3 000 mg/kg/jour (United States Environmental Protection Agency, 2005; Agence de réglementation de la lutte antiparasitaire, 2002b).

Quatre études ont été réalisées dans le but d'évaluer le potentiel génotoxique du p-menthane-3,8-diol (98,3 %). Quoiqu'il ait induit une réaction positive lors d'un essai d'aberration microsomale *in vitro*, ce produit n'a pas engendré de réaction positive lors du test du micronoyau chez la souris dans des conditions *in vivo*. Dans l'ensemble, les résultats obtenus dans ces études ne suggèrent pas que le p-menthane-3,8-diol soit génotoxique (United States Environmental Protection Agency, 2005; Agence de réglementation de la lutte antiparasitaire, 2002b).

Aucune information concernant les effets possibles sur la reproduction chez les animaux ou les humains par le p-menthane-3,8-diol n'a été retracée dans la littérature médicale (par une recherche sur PubMed), ni dans les fichiers de l'ARLA.

2.1.3.4 Pharmacocinétique

Aucune information spécifique sur le métabolisme du p-menthane-3,8-diol n'a pu être retracée dans la littérature scientifique. Cependant, dans leur rapport, l'ARLA mentionne qu'il semble être un important métabolite urinaire chez le rat à la suite d'une exposition orale au menthol (Agence de réglementation de la lutte antiparasitaire, 2002b). Ce dernier serait donc un bon indicateur du comportement toxicologique du p-menthane-3,8-diol. Plus de 70 % d'une dose orale de menthol de 500 mg/kg administrée chez des rats Fisher a été excrétée dans les 48 heures suivantes en des quantités égales dans l'urine et les matières fécales. Chez les rats dans lesquels on avait introduit une canule dans le canal cholédoque, 74 % de la dose a été excrétée, 67 % dans la bile et 7 % dans l'urine. Aucune trace de menthol non transformé n'a été détectée dans l'urine, les matières fécales et la bile. Une différence importante a été remarquée entre les métabolites trouvés dans l'urine et ceux trouvés dans la bile. En effet, le menthol glucuroconjugué était dominant dans la bile, alors qu'une variété de produits d'oxydation se retrouvait dans l'urine. À la suite d'une administration quotidienne de menthol aux rats durant une période pouvant atteindre 20 jours, des produits d'oxydation des groupes méthyles et isopropyles se sont avérés des métabolites urinaires importants. Le menthol glucuroconjugué a également été trouvé dans l'urine (Agence de réglementation de la lutte antiparasitaire, 2002b).

2.1.3.5 Cas d'intoxication chez les humains

Aucun cas d'intoxication chez les humains spécifique au p-menthane-3,8-diol n'a été retracé dans la littérature (par une recherche dans PubMed).

2.1.3.6 Durée de protection

Tout comme pour l'huile de citronnelle, il existe très peu d'études disponibles ayant évalué spécifiquement la durée de protection des produits à base de p-menthane-3,8-diol, puisqu'il s'agit généralement d'études comparatives entre divers produits insectifuges. Ces études ont été menées en laboratoire ou en milieu naturel et la durée de protection obtenue pour chaque insectifuge peut varier énormément en fonction de divers paramètres.

L'ARLA a répertorié un certain nombre d'études qui vérifiaient l'efficacité du p-menthane-3,8-diol (concentrations de 5 % et 10 %) pour chasser les maringouins, les mouches noires et les autres insectes piqueurs. Selon cet organisme, les essais en laboratoire et sur le terrain ont démontré que cette matière active est réellement insectifuge et qu'elle protégeait pour une période supérieure à 1,5 heures et ce, pour plusieurs espèces de moustiques (Agence de réglementation de la lutte antiparasitaire, 2002b). Depuis la publication de l'ARLA, quatre études ont tenté de comparer l'efficacité du p-menthane-3,8-diol ou de l'huile d'eucalyptus (produit mère) avec celle du DEET et/ou d'autres types d'insectifuges.

Une étude de Barnard *et al.* (2002) a comparé l'efficacité du p-menthane-3,8-diol (40 %) avec celle du DEET (25 %) et d'autres produits insectifuges homologués aux États-Unis. À la suite de tests en laboratoire, les auteurs ont noté une durée de protection complète contre les piqures de moustiques (*Oc.*) de 3,8 heures en moyenne pour le p-menthane-3,8-diol, comparativement à 5,6 heures en moyenne pour le DEET (Barnard *et al*., 2002).

Moore *et al.* (2002) ont réalisé une étude en milieu naturel afin de comparer l'efficacité insectifuge du p-menthane-3,8-diol (30 %) et de deux autres insectifuges à base d'huiles essentielles, avec celle du DEET (15 %). Les auteurs ont rapporté que le p-menthane-3,8-diol et le DEET avaient respectivement offert une protection à 96,9 % et 84,8 % pour une durée de quatre heures (Moore *et al*., 2002).

L'étude de Choi *et al.* (2002) a comparé l'efficacité insectifuge de quatre huiles essentielles, dont l'huile d'eucalyptus (0,5 %) extraite de la plante *Eucalyptus globulus*, contre les piqures de moustiques (*Cx pipiens pallens*). À la suite d'un test sur des souris en laboratoire, les auteurs ont rapporté que l'huile d'eucalyptus avait une durée de protection moyenne de 33,2 minutes. Ils ont également remarqué un taux de protection de 70 % sur une période d'une heure (Choi *et al.*, 2002).

Hadis *et al.* (2003) ont comparé l'efficacité de quatre huiles essentielles, dont l'huile d'eucalyptus extraite de l'eucalyptus citron (*Eucalyptus maculata citrodion)* avec celle du DEET à des concentrations de 40 % et 50 % pour chaque produit. À la suite d'un test en milieu naturel effectué sur des humains, l'huile d'eucalyptus et le DEET ont respectivement offert une protection de 91 % et de 93 % contre diverses espèces de moustiques par rapport au groupe contrôle. Aucune durée de protection n'a été indiquée dans cette étude (Hadis *et al.*, 2003).

L'efficacité du p-menthane-3,8-diol ou de l'huile d'eucalyptus varie beaucoup d'une étude à l'autre, puisque les concentrations de produit actif et les conditions expérimentales n'y sont pas les mêmes. Néanmoins, ce produit semble répondre au critère d'efficacité de l'ARLA pour l'homologation, c'est-à-dire avoir une protection minimale de 95 % contre les piqures de moustiques pour une période de 30 minutes.

2.1.4 DEET

Tel qu'indiqué dans Sanfaçon *et al.* (2002), le DEET est l'ingrédient actif ayant été le plus étudié. Seuls les nouveaux éléments sont décrits ici.

D'après la banque de données de l'ARLA d'octobre 2004, le DEET est disponible sur le marché canadien dans plus de 165 produits insectifuges conçus pour prévenir les piqures d'insectes chez les humains (Agence de réglementation de la lutte antiparasitaire, 2004d). Ces produits ont des concentrations de DEET variant entre 5 et 95 % et se présentent sous différentes formes (pulvérisateur, lotion, gel, lingette ou crème). À la suite de la réévaluation des insectifuges personnels contenant du DEET effectuée en 2002 par l'ARLA, les préparations commerciales à concentration supérieure à 30 % de ce produit actif ne peuvent plus être homologuées. Ces produits ne sont donc plus disponibles sur le marché canadien depuis le 31 décembre 2004 (Agence de réglementation de la lutte antiparasitaire, 2002a).

2.1.4.1 Propriétés physico-chimiques

Le DEET est désigné par deux appellations, soit le N, N-diéthyl-3-methylbenzamide ou le N, N-diéthyl-m-toluamide (Hayes Jr. et Laws Jr., 1991). Un synonyme du DEET couramment utilisé est le diéthyltoluamide. Son numéro du CAS est le 134-62-3.

2.1.4.2 Mode d'action

Le DEET affecterait la capacité de l'insecte piqueur à repérer sa proie en perturbant les fonctions des récepteurs des antennes du moustique. Ces récepteurs servent à déceler la présence de substances chimiques odoriférantes (Koren *et al*., 2003; National Pesticide Telecommunications Network, 2000a; Fradin, 1998; Qiu *et al.*, 1998); (Grondin, 1998 [tiré de Sanfaçon *et al.*, 2002]).

2.1.4.3 Caractéristiques toxicologiques

Plusieurs études rapportées dans Sanfaçon *et al* (2002) permettent de dresser le profil toxicologique du DEET. Les principaux points sont repris dans les sections suivantes accompagnés d'une mise à jour des données le cas échéant.

- Toxicité aigüe

Aucune nouvelle donnée concernant la toxicité aigüe du DEET, obtenue principalement par les expériences réalisées sur des animaux de laboratoire et par les cas d'intoxication survenus chez les humains, n'a été recensée dans la littérature médicale. L'US EPA classe le DEET

dans la catégorie de toxicité III[6], laquelle correspond à une toxicité légère (United States Environmental Protection Agency, 1998b).

En somme, à la suite d'une exposition, le DEET peut provoquer notamment des irritations de la peau, des yeux et des muqueuses ainsi que des picotements, des desquamations, des érythèmes et des assèchements cutanés. Il s'agit là d'effets directs. Par voies cutanée et orale, le DEET peut induire également des effets systémiques se traduisant par un désordre du système nerveux central et une toxicité cardiovasculaire. Les symptômes pouvant se manifester sont de l'ataxie, de l'anxiété, de l'irritabilité, de la confusion, des troubles psychiatriques, de l'anaphylaxie, des mouvements anormaux, des tremblements, des convulsions et des décès.

- Toxicités subchronique et chronique

À partir des données disponibles relatives aux toxicités subchronique et chronique du DEET sur des animaux de laboratoire, les effets systémiques pouvant se manifester à la suite de l'ingestion de DEET comprennent une baisse au niveau du poids corporel (rats, souris, hamsters, lapins, chiens), de la consommation alimentaire (rats, souris, hamsters, lapins, chiens) et du taux de cholestérol (chiens) ainsi qu'une augmentation du poids du foie (rats, souris), de la salivation (chiens), des mouvements anormaux de la tête (chiens) et des tremblements (chiens). Des décès peuvent également se produire (rats, hamsters).

Les effets directs pouvant survenir lors d'une exposition subchronique par voie cutanée sont similaires à ceux d'une toxicité aigüe. Ainsi, des picotements (humains), des desquamations (lapins, cochons d'Inde) ainsi que des irritations (lapins) et des assèchements cutanés (lapins, cochons d'Inde) peuvent survenir. En ce qui concerne les effets systémiques suite à une exposition cutanée, le DEET peut perturber le cycle de l'urée (humains, souris) et provoquer des lésions rénales (rats).

Parmi les études plus récentes, Abou-Donia *et al.* ont exposé des rats à des concentrations de 4, 40 ou 400 mg/kg/jour de DEET (produit technique) en combinaison ou non avec 0,013, 0,13 ou 1,3 mg/kg/jour de perméthrine (93,6 %) par voie cutanée, durant 60 jours (Abou-Donia *et al.*, 2001a). Les auteurs ont noté une diminution de la perméabilité de la barrière sang-cerveau du tronc cérébral, ainsi que de la barrière hémato-testiculaire à la suite d'une exposition à 40 ou 400 mg/kg/jour de DEET seul. Une diminution de perméabilité de la barrière sang-cerveau dans le cortex cérébral a également été remarquée à la suite d'une exposition au DEET (40 mg/kg/jour) en combinaison avec la perméthrine (1,3 mg/kg/jour). Des anomalies dans la fonction sensori-motrice ont été remarquées dans tous les groupes d'exposition au DEET seul ou en combinaison avec la perméthrine.

[6] L'US EPA a défini quatre catégories de toxicité pour les pesticides :
I : très toxique, II : relativement toxique, III : légèrement toxique et IV : très peu toxique.

Des rats ont été exposés par voie cutanée à des doses de DEET (produit technique) de 40 mg/kg/jour dans 70 % d'éthanol seul ou en combinaison à une dose de 0,13 mg/kg/jour de perméthrine dans 70 % d'éthanol quotidiennement durant 60 jours. Une mort cellulaire de neurones dans le cortex cérébral, dans l'hippocampe et dans le cervelet a été remarquée à la suite de l'exposition au DEET seul ou en combinaison avec la perméthrine (Abdel-Rahman *et al.*, 2001).

Par ailleurs, une étude a examiné la performance sensori-motrice chez des rats ayant été exposés à une dose de DEET (produit technique) de 40 mg/kg/jour par voie cutanée quotidiennement, durant 45 jours, seul ou en combinaison avec d'autres produits chimiques. Les résultats suggèrent qu'une exposition au DEET à la dose d'exposition testée peut provoquer un déficit neurocomportemental, ainsi que des altérations ponctuelles de l'acétylcholinestérase et des récepteurs d'acétylcholine (Abou-Donia *et al.*, 2001b).

Enfin, Abdel-Rahman *et al.* (2004) ont exposé des rats à des concentrations de 40 mg/kg/jour de DEET (produit technique) seul ou en combinaison avec d'autres produits chimiques par voie cutanée quotidiennement durant 30 jours. Les résultats obtenus suggèrent qu'une exposition au DEET seul ou en combinaison avec d'autres produits chimiques induit des déficits neurocomportementaux, ainsi qu'une dégénération de neurones dans le cerveau. Aucun signe de neurotoxicité n'a cependant été noté (Abdel-Rahman *et al.*, 2004).

Effets sur le développement et la reproduction

En ce qui a trait aux effets du DEET sur le développement (potentiel tératogène) et la reproduction chez les animaux, les études sur le sujet sont plutôt contradictoires (Sanfaçon *et al.*, 2002).

Une étude de cohorte prospective a été effectuée afin d'évaluer si l'application de DEET chez la femme enceinte était sécuritaire pour le fœtus. Au total, 897 femmes enceintes ont participé à cette étude. Parmi celles-ci, 449 ont été exposées au DEET (1 700 mg/j) en combinaison avec du thanaka (produit cosmétique servant de solvant; 3 200 mg/j) par voie cutanée, quotidiennement durant le deuxième et le troisième trimestre de la grossesse. Les 448 autres femmes étaient exposées de la même façon au thanaka seul (3 200 mg/j), servant de groupe contrôle. Des échauffements de la peau ont été rapportés plus souvent chez les femmes exposées au DEET et au thanaka que celles exposées au thanaka seul. Cependant, aucun effet néfaste n'a été observé sur la survie, la croissance ou le développement de l'enfant à la naissance ou à l'âge d'un an (McGready *et al*., 2001).

Mutagénicité, génotoxicité et neurotoxicité

Selon les résultats des quelques études disponibles, il n'y aucune évidence du potentiel mutagène (United States Environmental Protection Agency, 1998b) et du potentiel cancérigène (National Pesticide Telecommunications Network, 2000a)du DEET. De plus, aucune relation directe n'a été établie entre l'exposition au DEET et l'apparition de cancer

chez l'humain. D'ailleurs, l'US EPA a classé ce produit dans le groupe D des produits cancérigènes, c'est-à-dire des produits non classifiables pour leur potentiel cancérigène chez l'humain (National Pesticide Telecommunications Network, 2000a).

Une étude de Tisch *et al.* (2002) a cependant suggéré un potentiel génotoxique du DEET sur les cellules des muqueuses nasales chez l'humain, ayant remarqué une augmentation des cellules endommagées en fonction de la dose administrée *in vitro*. Des doses de DEET de 0,5 mM (95 mg/l), 0,75 mM (143 mg/l) et 1,0 mM (191 mg/l) ont été testées. À la suite d'un traitement des cellules nasales obtenues par biopsie chez 21 patients, une diminution dépendante de la dose des cellules non endommagées a été observée. Selon les auteurs de l'étude, ce résultat suggère que le DEET détient un potentiel carcinogène sur les cellules des muqueuses nasales chez l'humain (Tisch *et al*., 2002). Toutefois, aucune publication ne démontre ce phénomène chez l'humain *in vivo*.

2.1.4.4 Pharmacocinétique

Tel que relevé par Sanfaçon *et al*. (2002), peu d'études sur la pharmacocinétique du DEET chez les humains ont été réalisées. Selon les doses de DEET appliquées, les taux de pénétration cutanée mesurés chez l'humain oscillent entre 9 et 56 %. Quant aux taux d'absorption observés chez l'humain, ils varient entre 3 % et 20 %. Selon les espèces animales et les doses appliquées, les taux d'absorption cutanée varient entre 7,9 et 72,9 %. Avant d'être éliminé essentiellement par voie urinaire en quelques heures ou quelques jours selon la dose impliquée, le DEET se concentre dans divers organes et tissus. Parmi les études plus récentes, effectuées notamment chez l'humain, des auteurs ont rapporté que le DEET avait été retrouvé dans 8 % des cordons ombilicaux des enfants dont les mères avaient été exposées par voie cutanée à des doses de 1 700 mg/j de DEET quotidiennement durant les deuxièmes et troisièmes trimestres de la grossesse (McGready *et al.*, 2001).

Quant à l'accumulation de DEET dans l'épiderme, certaines études (Snodgrass *et al.*, 1982; Blomquist *et al.*, 1975); (Blomquist et Thorsell, 1977 [tiré de Sanfaçon *et al.*, 2002]) suggèrent qu'un tel phénomène a lieu et que le produit est libéré lentement dans l'organisme, tandis que l'étude menée par Selim *et al.* (Selim *et al.*, 1995) tend à prétendre le contraire. D'ailleurs, Robbins et Cherniack (1986) rapportent que des traces de DEET ont été mesurées dans la peau, les muscles et les tissus adipeux de souris, soit un à trois mois après avoir été appliqué à une dose de 100 mg/kg (Robbins et Cherniack, 1986).

Enfin, l'exposition au DEET en combinaison avec un écran solaire ou d'autres produits chimiques peut augmenter l'absorption du DEET par la peau selon les résultats d'études plus récentes. Une étude a été réalisée chez la souris afin de quantifier la cinétique d'absorption percutanée du DEET à plusieurs concentrations, ainsi que dans une préparation commerciale contenant un écran solaire. Malgré la plus faible concentration en DEET du produit contenant l'écran solaire (10 % vs 20 % à 30 %), ce dernier avait un temps de détection six fois plus rapide que les autres produits insectifuges (5 min vs 30 min). De plus, la pénétration du DEET pour le produit contenant l'écran solaire était 3,4 fois plus élevée que celle du DEET pour les produits ne possédant pas d'écran solaire (Ross *et al*., 2004). Par

ailleurs, Riviere *et al.* (2003) ont effectué une étude sur l'absorption percutanée du DEET lorsqu'il est administré simultanément à d'autres produits toxiques chez le porc. Leurs résultats suggèrent que le solvant ainsi que la concentration utilisée dans la préparation commerciale de l'insectifuge ont des effets minimes sur l'absorption du DEET. Cependant, l'exposition simultanée à d'autres produits toxiques peut moduler l'absorption percutanée du DEET (Riviere *et al*., 2003).

2.1.4.5 Cas d'intoxication chez les humains

Malgré la très grande utilisation des produits contenant du DEET et ce, à travers le monde, le nombre de cas d'intoxication chez les humains s'avère relativement faible (Sanfaçon *et al.*, 2002). D'après la littérature médicale, les cas d'intoxication associés à une exposition topique ou orale des insectifuges à base de DEET se rapportent à des irritations oculaires ainsi que des effets dermatologiques, allergiques, cardiovasculaires et neurotoxiques, et peut-être aussi des effets tératogènes. Ainsi, il peut s'agir d'effets directs ou systémiques. En général, les symptômes apparaissent environ 30 à 60 minutes après une exposition aigüe, tandis qu'en présence d'une exposition chronique, les symptômes peuvent se manifester des jours, des semaines ou des mois plus tard.

Les cas d'intoxication systémique répertoriés sont principalement associés à des enfants suite à des applications répétées sur de grandes surfaces corporelles, quoiqu'il y ait malgré tout quelques cas observés chez des adultes (Tenenbein, 1987). D'ailleurs plus récemment, Briassoulis *et al.* (2001) ont répertorié l'ensemble des cas d'encéphalopathies associées à une exposition au DEET chez les enfants. Selon ces auteurs, les symptômes les plus communément rapportés étaient les convulsions (72 %), le coma (39 %), les changements de comportement (28 %), ainsi que l'ataxie (17 %). Les crises étaient significativement plus fréquentes chez les enfants exposés par contact cutané. Cependant, le coma était significativement plus fréquent chez les enfants exposés par voie orale. Ces auteurs rapportent également le cas d'un garçon de 18 mois ayant subi des crises généralisées accompagnées de difficultés respiratoires. La nuit précédente, il avait été exposé par voie cutanée à un insectifuge à base de DEET (17,6 %). Le matin même, il était somnolent et irritable, puis avait des vomissements. Lors de l'apparition de convulsions généralisées, ainsi que de difficultés respiratoires, il a immédiatement été hospitalisé. Ses symptômes se sont estompés à la suite de son traitement et son état est revenu à la normale le jour suivant son hospitalisation (Briassoulis *et al.*, 2001).

Quant aux effets directs, même si le nombre de cas d'intoxication humaine s'avère très supérieur au nombre de cas associés aux effets systémiques, les symptômes rapportés dans la littérature se résument notamment à des irritations oculaires, des conjonctivites et des dermatites (urticaire, érythème et dermatose bulleuse). De plus, selon une étude menée auprès des centres antipoison américains (Bell *et al*., 2002), sur les 20 764 cas rapportés entre 1993 et 1997 suite à une exposition à un produit contenant du DEET, plus de 85,8 % des gens exposés n'ont eu aucune réaction. Des 14,2 % des cas ayant rapporté des symptômes associés à une exposition par voie cutanée au DEET, c'est la peau qui a été la plus fréquemment touchée, suivie du système gastro-intestinal, ainsi que du système

nerveux ou ont subi généralement des réactions mineures (ex. : irritations cutanées, oculaires et des muqueuses). La majorité de ces cas se sont produits chez les enfants (64,5 %) et les nourrissons (18,6 %). De l'ensemble des cas d'intoxication rapportés, une faible proportion (10 %) s'est produite à la suite d'une exposition par voie cutanée.

Les résultats d'un questionnaire portant sur les risques à la santé associés à l'utilisation quotidienne d'insectifuges personnels ont été rapportés dans un article de Sharma (2001). Parmi les 174 utilisateurs d'insectifuges à base de DEET, 11 % (n = 20) ont rapporté des réactions à la peau telles qu'une éruption cutanée, une tache toxinique ou dans certains cas la peau qui noircit, devient huileuse ou picote. Trois personnes se sont plaintes de la mauvaise odeur suffocante et d'une irritation aux yeux (Sharma, 2001).

Les données du CAPQ indiquent qu'entre 2000 et 2003, plus de 491 cas signalés ont été exposés à diverses concentrations de DEET, majoritairement par voie orale (54,4 %), mais également par voie oculaire (24,2 %), par contact cutané (9,0 %), par voies multiples (7,3 %) ou par inhalation (4,7 %). De ce nombre, plus de 80 % se sont produits chez des enfants de 15 ans ou moins. Dans l'ensemble, plus de 85 % des cas n'ont présenté aucun symptôme, un effet léger, ou un effet clinique minimal sans relance. Les cas d'intoxication modérés ou sévères représentent moins de 1,0 % de l'ensemble des cas signalés.

2.1.4.6 Durée de protection

Les résultats de différentes études indiquent que l'effet répulsif du DEET varie selon sa concentration. Ainsi, il semblerait que de cet ingrédient actif puisse plafonner lorsque sa concentration est de 30 % (Conti et Oiliveri R., 2001) à 50 % (Bourassa, 2000; Fradin, 1998; Brown et Hebert, 1997). De plus, des produits ayant des concentrations supérieures à 50 % procurent seulement une courte durée supplémentaire de protection contre les insectes piqueurs (Fradin, 1998; Brown et Hebert, 1997).

Lors d'une étude sur le terrain, Govere *et al.* (2001) ont observé qu'un insectifuge à base de DEET (15 %) avait permis la réduction du nombre de piqures de moustiques *Anopheles arabiensis* de 69,2 % en moyenne par nuit, par rapport au groupe contrôle. La période d'échantillonnage était de quatre heures (entre 18 h 30 et 22 h 30) et le lieu d'expérimentation se situait dans le « *Kruger National Park* », en Afrique du sud (Govere *et al.*, 2001).

Différents travaux terrain ont également été réalisés en forêt tropicale au nord de l'Australie en 2002 et en 2004 par Frances *et al*. afin d'évaluer l'efficacité de certains produits insectifuges, incluant le DEET. Lors des tests de nuit, un insectifuge à base de DEET concentré à 35 % a permis une protection de > 95 % contre les moustiques durant sept heures. Lors des tests de jour, la préparation commerciale à base de DEET concentré à 20 % offrait une protection > 95 % pour une période de six heures, alors que celle à base de DEET concentré à 33 % permettait une protection de > 95 % pour une période de huit heures (Frances *et al*., 2002). Par ailleurs, une autre étude a démontré que le DEET concentré à 20 % et 35 % permettait une protection > 95 % contre le moustique

Cx annulirostris pour une période de sept heures. D'un autre côté, l'insectifuge à base de DEET (20 %) a permis une protection de moins de 87 % contre les moustiques *An. meraukensis* et *An. bancroftii* seulement une heure après l'application, alors que celui à base de DEET (35 %) permettait une protection de > 95 % une heure après l'application (Frances *et al.*, 2004).

2.1.5 Données relatives aux insectifuges du Centre antipoison du Québec (1988-2003)

La banque de données du CAPQ indique que le nombre de dossiers concernant des intoxications et/ou des expositions aux insectifuges personnels ont augmenté à partir de 1993, passant effectivement de 121 dossiers en 1992 à 220 en 1994. De 1994 à 2003, la moyenne annuelle était d'environ 180 dossiers (figure 2.1).

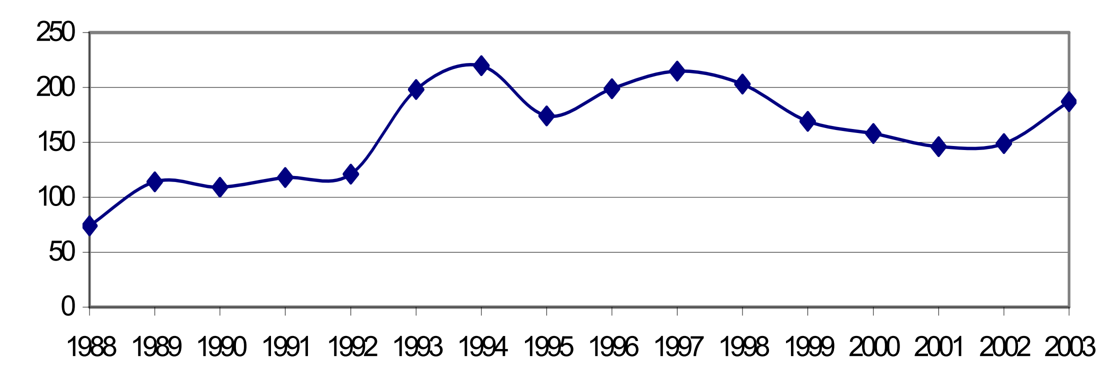


Figure 2.1 Répartition des intoxications aux insectifuges selon l'année

La période durant laquelle les insectifuges sont le plus utilisés débute vers la fin du printemps avec les activités de plein air et l'éclosion d'insectes piqueurs et se poursuit *grosso modo* jusqu'au début de l'automne. Ainsi, cette période s'échelonne principalement entre les mois de mai et septembre. L'augmentation de l'utilisation de ces produits engendre par le fait même un accroissement des risques d'intoxication. En effet, les cas d'intoxication occasionnés par ces produits surviennent essentiellement au cours de cette période. Tel qu'illustré à la figure 2.2, le nombre de cas d'intoxication augmente significativement en mai, pour atteindre un pic en juin, pour ensuite amorcer une baisse à partir du mois de juillet.

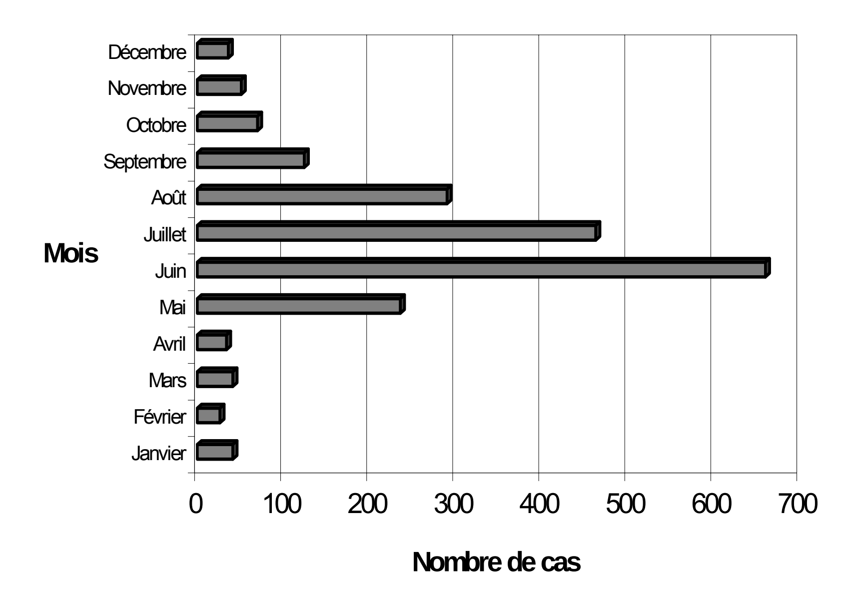


Figure 2.2 Répartition des intoxications aux insectifuges selon le mois de l'année

Au Québec, les intoxications aux insectifuges concernent principalement deux ingrédients actifs : le DEET et l'huile de citronnelle. En considérant la répartition des intoxications selon l'âge des personnes et le type d'ingrédient impliqué, il appert que le DEET est le principal produit concerné et ce, quelque soit la catégorie d'âge. Ces résultats peuvent suggérer que les gens utilisent davantage des insectifuges à base de DEET.

Selon le CAPQ, la répartition des cas enregistrés en fonction du sexe était relativement équitable entre 2000 et 2003, soit 48,1 % de femmes et 51,9 % d'hommes pour le DEET et 46,9 % de femmes et 53,1 % d'hommes pour l'huile de citronnelle (Centre antipoison du Québec, 2004).

En ce qui concerne la répartition des cas en fonction de l'âge, il est intéressant de constater que près de 80 % des intoxications correspondent à des enfants âgés de 0 à 15 ans. Plus précisément, entre 2000 et 2003 ce taux reflète que 65,4 % des cas touchent des enfants âgés de moins de 6 ans et que 16,9 % touchent des enfants âgés entre 6 et 15 ans pour l'huile de citronnelle. Pour le DEET, ce taux reflète 56,6 % et 23,4 %, respectivement pour ces deux groupes d'âge.

2.1.6 Produits insectifuges de remplacement

De nombreux produits de remplacement au DEET ont été testés, sans succès quant à l'efficacité ou l'innocuité de la préparation commerciale. Cependant, certains produits s'avèrent aussi efficaces et sécuritaires que le DEET. Le KBR 3023, communément appelé Bayrepel ou Picaridin, en est un bon exemple. Déjà disponible sur les marchés européens et australiens, ce produit serait bientôt disponible en Amérique du Nord (Scheinfeld, 2004). Selon le fabriquant, il agirait en formant une mince couche odorante à la surface de la peau,

interférant avec le mécanisme d'attraction des moustiques (Bayer, 2004). De nouveaux tests de terrain et de laboratoire démontrent que son efficacité est semblable à celle du DEET (Badolo *et al*., 2004; Frances *et al.*, 2002), même si une étude récente semble avoir démontré que le DEET demeurait plus efficace que le Bayrepel (Klun *et al.*, 2003). Du côté de l'innocuité du produit, l'Organisation mondiale de la Santé (OMS) affirme qu'il détient un profil sécuritaire, ainsi que de bonnes propriétés cosmétiques et le recommande en tant qu'insectifuge efficace pour une utilisation chez l'être humain (Organisation mondiale de la Santé, 2000).

Parmi les autres produits de remplacement du DEET qui ont été proposés, les huiles essentielles extraites de plantes semblent prendre de plus en plus d'importance. Elles sont sélectives et ont peu ou pas d'effets néfastes sur les organismes non ciblés, ainsi que sur l'environnement (Yang *et al*., 2004). La limitation majeure à l'utilisation de ces insectifuges dits « naturels » demeure leur durée d'efficacité. En effet, il semble qu'ils ne protègent pas contre les moustiques pour une période suffisamment longue (Peterson, 2003). Jusqu'à présent, des milliers de plantes ont été testées pour leur potentiel insectifuge (Fradin, 2001). Certaines d'entre elles s'avèrent aussi efficaces que le DEET, selon une étude de laboratoire menée par Yang *et al.* (Yang *et al.*, 2004). En effet, les extraits de *Cinnamomum cassia*, de *Nardostachys chinensis*, de *Paeonia suffruticosa* et de *Cinnamomoum camphora* auraient des taux d'efficacité insectifuge respectifs de 91 %, 81 %, 80 % et 94 %. Ces taux paraissaient du même ordre ou supérieurs à celui du DEET (82 %). Toutefois, la durée de protection de ces extraits de plantes était insuffisante (< 30 minutes). D'autres auteurs ont testé l'efficacité insectifuge de plusieurs extraits de plantes en laboratoire ou sur le terrain. Parmi les résultats obtenus lors de ces études, certaines espèces semblaient se démarquer quant à leur propriété répulsive. Tel était le cas de *Myrothamnus flabellifolius* (Lukwa *et al.*, 2002), de *Cymbopogan citratus* (Oyedele *et al.*, 2002), de *Zanthoxylum limonella* (Das *et al.*, 2003), de *Cymbopogan martinii martinii* (Das et Ansari, 2003), ainsi que de *Ocimum selloi* (Padilha *et al.*, 2003). Cependant, les extraits de ces plantes ne permettaient pas tous une protection minimale à > 95 % pour une durée de plus de 30 minutes. De plus, des tests de toxicité devront être effectués avant la mise en marché de préparations commerciales composées de ces produits.

L'insectifuge idéal doit répondre à de nombreux critères. D'abord, il ne doit pas être toxique, ni irritant pour la peau. Puis, il doit avoir un large spectre d'efficacité contre différents arthropodes, ainsi qu'une durée de protection suffisante. Il doit également être résistant à l'abrasion ou au lessivage, ainsi qu'être abordable, facile à utiliser, sans odeur et avec une texture non huileuse (Petersen *et al*., 2003; Fradin, 2001). Aucun insectifuge ne répond à l'ensemble de ces critères (Fradin, 2001). Jusqu'en 1956, le gouvernement des États-Unis a testé plus de 20 000 composés insectifuges afin d'obtenir un produit pouvant répondre au plus grand nombre de ces critères (Petersen *et al.*, 2003). Ayant été découvert lors de cet exercice en 1953, le DEET est encore aujourd'hui l'insectifuge répondant au plus grand nombre des propriétés désirées (Petersen *et al.*, 2003).

2.1.7 Synthèse des insectifuges personnels

Les principaux éléments sur les insectifuges personnels homologués au Canada, soit l'huile de lavande, l'huile de citronnelle, le p-menthane-3,8-diol et le DEET sont résumés dans les paragraphes suivants.

2.1.7.1 Huile de lavande

L'insectifuge à base d'huile de lavande semblerait avoir une durée de protection réduite contre les moustiques (soit de 30 minutes ou moins). En raison de la rareté des informations disponibles sur ce produit, il s'avère difficile d'évaluer son innocuité pour les humains. Aucune information sur les risques potentiels à la santé d'une exposition à ce type d'insectifuges n'a été retrouvée dans la littérature médicale. Toutefois, sur la base du profil toxicologique des huiles essentielles en général, l'huile de lavande pourrait théoriquement provoquer, par contact direct, des irritations cutanées et oculaires. À la suite d'une ingestion, elle pourrait également occasionner divers symptômes tels que nausées, vomissements, céphalées et étourdissements.

À partir du 31 mars 2007, ce produit ne pourra plus être utilisé puisque son homologation prendra fin à cette date.

2.1.7.2 Huile de citronnelle

Les informations disponibles concernant les insectifuges homologués à base d'huile de citronnelle font ressortir que ceux-ci ont généralement une durée de protection de moins de 30 minutes à 2 heures selon la concentration, avec un maximum de 6 ou 8 heures. Il est à noter cependant que la durée de protection peut varier énormément en fonction de divers paramètres (ex. : température et degré d'humidité de l'air ambiant, degré d'activité physique et physionomie des utilisateurs, espèce de moustiques testée et densité d'insectes dans l'environnement).

Selon une étude portant sur des tests réalisés sur des animaux de laboratoire, l'huile de citronnelle (sous forme d'huile essentielle) pourrait avoir des effets mutagène et tératogène. Selon l'ARLA (Agence de réglementation de la lutte antiparasitaire, 2004e), l'huile de citronnelle naturelle contient une quantité variable de méthyleugénol, un agent cancérigène connu qui agit sur des sites multiples et affecte de nombreuses espèces. Toutefois, il est difficile d'évaluer si ces résultats s'avèrent transposables à une utilisation quotidienne d'un insectifuge à base d'huile de citronnelle par les humains. Dans le cadre du processus de réévaluation de l'ARLA, les parties intéressées n'ont pas fourni de données supplémentaires à l'ARLA. Il devient donc essentiel d'obtenir de nouvelles données d'innocuité pour ces résultats préoccupants. L'ARLA a donc fait appel à un comité d'experts scientifiques indépendants pour examiner les raisons justifiant la décision proposée dans la *Réévaluation de l'huile de citronnelle et des composés apparentés pour l'utilisation comme insectifuge personnel* avant de rendre sa décision finale (Agence de réglementation de la lutte antiparasitaire, 2005a). Cet examen, dont les résultats sont toujours attendus, permettra de

s'assurer que l'ARLA a exploré toutes les options scientifiques possibles avant de rendre sa décision.

La majorité des cas d'intoxication répertoriés s'est produite à la suite d'une exposition par voie orale. Toutefois, ce sont les irritations cutanées qui demeurent la principale préoccupation associée à l'utilisation des produits à base d'huile de citronnelle (United States Environmental Protection Agency, 1999). De même, les insectifuges à base d'huile de citronnelle pourraient contribuer à sensibiliser la peau et, conséquemment, occasionner des réactions allergiques chez certaines personnes (Agence de réglementation de la lutte antiparasitaire, 2004b; United States Environmental Protection Agency, 1997).

2.1.7.3 p-menthane-3,8-diol

L'efficacité du p-menthane-3,8-diol semble avoir été démontrée. En effet, les études d'efficacité publiées ont rapporté une efficacité à 95 % contre les moustiques pour une période d'au moins 30 minutes. Certaines études ont même soulevé une durée d'efficacité pouvant aller jusqu'à 3,8 et 4 heures (Barnard *et al.*, 2002; Moore *et al.*, 2002).

Les études toxicologiques effectuées sur le p-menthane-3,8-diol démontrent la faible toxicité de ce produit. Au niveau de la toxicité aigüe, le produit homologué Off! Botanicals Insect Repellent 1® comporte une faible toxicité orale et cutanée (Agence de réglementation de la lutte antiparasitaire, 2002b). Il est un irritant moyen et léger, respectivement pour les yeux et la peau. Il n'est pas sensibilisant pour la peau, ni génotoxique, cancérigène ou oncogène. Aucune étude sur la reproduction n'a été effectuée, cependant, ce produit ne semble pas être fœtotoxique. D'ailleurs, aucun cas d'intoxication au p-menthane-3,8-diol n'a été publié depuis sa mise en marché. Toutefois, contrairement à plusieurs autres insectifuges, le p-menthane-3,8-diol n'est sur le marché que depuis quelques années.

2.1.7.4 DEET

À la lumière des informations disponibles, le DEET serait l'ingrédient actif offrant la meilleure durée de protection contre les insectes piqueurs. Généralement, les insectifuges à base de DEET protègent contre les piqures d'insectes entre près de 2 et 6,5 heures selon la concentration. Il est à noter cependant que la durée de protection peut varier énormément en fonction de divers paramètres (ex. : température et degré d'humidité de l'air ambiant, degré d'activité physique et physionomie des utilisateurs, espèce et densité des moustiques). Il semblerait que l'effet répulsif du DEET puisse plafonner quand sa concentration est de 30 à 50 %, étant donné qu'un insectifuge ayant une concentration supérieure procure seulement une courte durée supplémentaire de protection contre les insectes piqueurs.

L'utilisation du DEET n'est cependant pas sans risque. Survenant principalement chez de jeunes enfants, les intoxications chez les humains associées à une exposition au DEET par voie orale ou topique se traduisent par des irritations oculaires ainsi que par des effets dermatologiques (ex. : urticaire de contact, érythème, dermatose bulleuse), allergiques (choc anaphylactique), cardiovasculaires (ex. : hypotension, bradycardie) et neurotoxiques (ex. : migraine, ataxie, irritabilité, confusion, psychose aigüe, tremblements, convulsions, coma), et

peut-être aussi par des effets tératogènes (ex. : malformation crânienne, retard mental, mauvaise coordination sensori-motrice). Des décès (n = 6) sont survenus conséquemment à une atteinte neurologique. Quant aux effets sur la reproduction et au potentiel tératogène du DEET, les études à ce sujet semblent plutôt contradictoires. À la lueur des quelques études relatives à la toxicité chronique du DEET, il n'y a aucune évidence des potentiels mutagène (United States Environmental Protection Agency, 1998b) et cancérigène (National Pesticide Telecommunications Network, 2000a) de ce produit, quoiqu'il ait démontré un potentiel génotoxique sur les cellules des muqueuses nasales lors d'une expérience *in vitro* (Tisch *et al.*, 2002).

Généralement, les intoxications sont occasionnées à la suite d'une exposition aigüe impliquant des doses élevées ou encore à une exposition chronique occasionnant une accumulation de DEET dans la masse corporelle. Toutefois, le nombre de cas d'intoxication chez les humains retracés dans la littérature s'avère relativement faible et ce, malgré la très grande utilisation des produits à base de DEET à travers le monde. C'est pourquoi le DEET est tout de même considéré comme étant un insectifuge démontrant un profil avantageux tant du point de vue de son efficacité que de son niveau de risque relativement peu élevé (Roberts et Reigart, 2004; Barnard, 2000; Hampers *et al*., 1999; Fradin, 1998; Qiu *et al.*, 1998; Hayes Jr. et Laws Jr., 1991; Edwards et Johnson, 1987; Roland *et al*., 1985).

Considérant que le DEET n'est pas sans risque et que l'augmentation du temps de protection totale n'augmente pas proportionnellement avec la concentration, l'ARLA a décidé que les préparations commerciales ne doivent pas excéder une concentration de DEET de 30 % pour conserver leur homologation (Agence de réglementation de la lutte antiparasitaire, 2002a).

2.1.8 Recommandations émises par les autorités de santé publique

Parmi les conseils fondamentaux émis par le MSSS et l'ARLA dans le cadre de la protection personnelle contre le VNO, il est spécifié qu'il faut utiliser raisonnablement un insectifuge, et seulement pour prévenir plus efficacement les piqures de moustiques à l'occasion des activités extérieures (Agence de réglementation de la lutte antiparasitaire, 2004b). De plus, il est recommandé d'utiliser des insectifuges qui sont homologués au Canada et de ne les appliquer que sur les vêtements ou les parties du corps non protégées par les vêtements.

Afin de minimiser les effets indésirables potentiels d'un insectifuge à base d'huile de lavande, de citronnelle ou de p-menthane-3,8-diol, il importe donc de respecter les consignes d'utilisation imprimées sur l'étiquette du produit (Agence de réglementation de la lutte antiparasitaire, 2004b). À ce sujet, il est recommandé de ne pas appliquer :

- d'huile de lavande sur des enfants âgés de moins de deux ans;
- d'huile de citronnelle sur des enfants âgés de moins de deux ans;
- de p-menthane-3,8-diol sur les enfants âgés de moins de trois ans.

Pour réduire au minimum les effets indésirables associés au DEET tout en offrant une protection suffisante contre le VNO, le MSSS et l'ARLA recommandent :

- pour les adultes, l'utilisation d'un produit à base de DEET en concentration de 30 % ou moins sur les parties du corps non protégées par des vêtements[7];
- pour les femmes enceintes ou qui allaitent, l'utilisation d'un produit à base de DEET en concentration de 30 % ou moins sur les parties du corps non protégées par des vêtements[8];
- pour les enfants de 2 à 12 ans, l'utilisation modérée (pas plus de 3 applications par jour) d'un produit à base de DEET en concentration de 10 % ou moins sur les parties du corps non protégées par des vêtements. De plus, l'ARLA recommande d'éviter l'emploi prolongé de ces produits;
- pour les enfants de 6 mois à 2 ans, l'utilisation d'un produit contenant du DEET concentré à 10 % ou moins. Il doit être appliqué modérément par un adulte sur la peau de l'enfant non protégée par les vêtements, pas plus d'une application par jour. L'emploi prolongé de ce produit devrait être évité, ainsi que son utilisation sur les mains et dans le visage;
- pour les enfants de moins de 6 mois, l'utilisation de produits à base de DEET n'est pas recommandée.

De plus, l'utilisation combinée d'un écran solaire et d'un insectifuge à base de DEET est également déconseillée. En effet, non seulement la crème solaire augmente-t-elle l'absorption cutanée du DEET, mais ce dernier aurait lui aussi un effet sur la crème solaire, réduisant de 34 % son efficacité (Agence de santé publique du Canada, 2005).

2.2 INSECTICIDES DOMESTIQUES

L'utilisation d'insecticides domestiques pourrait être perçue par certaines personnes comme une autre mesure de protection personnelle contre les piqures de moustiques. Par définition, un insecticide est un produit chimique, naturel ou synthétique destiné à la destruction des insectes nuisibles (Grand dictionnaire terminologique, 2005). Les produits disponibles sur le marché sont offerts sous différentes formes (aérosols manuels, aérosols avec pulvérisateurs à piles, insecticides liquides, produits à la citronnelle, spirales et torches insecticides) et sont composés de différents ingrédients actifs.

---

7 Le Comité consultatif de la médecine tropicale et de la médecine des voyages (CCMTMV) indique cependant que pour les voyageurs se rendant hors du pays, dans des régions où le risque d'exposition à des maladies transmises par des arthropodes (MTA) l'emporte sur le risque de réaction indésirable au DEET, le critère d'utilisation de cet insectifuge devrait être abaissé. Selon le CCMTMV, les voyageurs pourraient donc utiliser des produits contenant jusqu'à 35 % de DEET à l'extérieur du Canada, dans des régions où les maladies transmises par les piqures d'insectes sont fréquentes (Agence de santé publique du Canada, 2005).

8 Selon l'ARLA, rien n'indique que l'utilisation du DEET par une femme enceinte ou qui allaite pourrait être dangereuse pour le fœtus ou le nourrisson (Agence de réglementation de la lutte antiparasitaire, 2004b).

2.2.1 Produits insecticides à usage domestique disponibles

Le fonctionnement et l'efficacité des principaux produits insecticides à usage domestique disponibles sur le marché québécois en 2004, ainsi que le profil toxicologique des ingrédients actifs contenus dans ces produits sont décrits dans les sections suivantes. Sanfaçon *et al*. (2002) décrivaient également ces produits. Seul les principaux éléments et les nouvelles données sont donc présentés ici.

2.2.1.1 Aérosols manuels et aérosols avec pulvérisateur à piles

Les aérosols sont tous à base de pyréthrines[9] ou de pyréthrinoïdes[10], dont les concentrations varient selon les produits. Des synergistes peuvent également être ajoutés tel que le butoxyde de pipéronyle (PBO) seul ou combiné au N-octyl bicycloheptène dicarboximide (MGK-264) (National Pesticide Telecommunications Network, 2000b).

Les aérosols à vaporisation manuelle peuvent être généralement utilisés à l'intérieur et à l'extérieur, alors que ceux avec pulvérisateurs à piles (batteries) doivent être installés à l'intérieur, habituellement près de l'entrée. La procédure d'utilisation pour l'intérieur est de vaporiser (manuellement ou automatiquement le produit dans une pièce maintenue fermée pendant un certain temps, afin d'obtenir le résultat escompté. Par la suite, les pièces doivent être aérées convenablement.

Les insecticides en aérosols manuels s'avèrent plus efficaces à l'intérieur qu'à l'extérieur où leur rendement est limité. En effet, ils se dispersent rapidement dans les endroits aérés, réduisant ainsi temporairement les populations de moustiques (American Mosquito Control Association, 2004). Leurs principaux avantages sont l'effet immédiat sur les moustiques, l'application rapide et le peu de matériel requis. Par contre, l'efficacité de ces produits n'est que de courte durée (American Mosquito Control Association, 2004). Quant aux aérosols avec pulvérisateur à piles, lorsqu'ils sont utilisés correctement, ils réduisent bel et bien le nombre d'insectes volants, mais de façon non spécifique (Centers for Disease Control and Prevention, 2000).

Comme ces deux types d'aérosols ne nécessitent pas de manipulation directe avec l'insecticide, cela implique un risque d'exposition moindre pour les utilisateurs, dans la mesure où ils sont utilisés aux bons endroits.

2.2.1.2 Insecticides liquides

Les insecticides liquides peuvent être concentrés ou dilués. Les pyréthrines, les pyréthrinoïdes, le propoxur et de le méthoxychlore font partie de leur composition qui est très variée. Certains insecticides contiennent également un synergiste, soit le PBO ou le MGK-264.

---

[9] De source naturelle, les pyréthrines sont dérivées des extraits de fleurs de chrysanthèmes (National Pesticide Telecommunications Network, 1998).

[10] Les pyréthrinoïdes sont la forme synthétique des pyréthrines (ex. : alléthrine, tétraméthrine, phénothrine) (National Pesticide Telecommunications Network, 1998).

Les insecticides lquides peuvent être utilisés à l'intérieur et/ou à l'extérieur par pulvérisation manuelle à l'aide d'une gâchette, d'un brumisateur au gaz propane (thermique) ou d'un atomiseur (non thermique).

Au cours du *Programme de réévaluation de l'ARLA* (Agence de réglementation de la lutte antiparasitaire, 2004a), les titulaires de l'homologation du méthoxychlore ont décidé de retirer leur demande d'homologation. Ainsi, l'ARLA a retiré les produits commerciaux à base de méthoxychlore du *Programme de réévaluation* et a établi un calendrier d'abandon graduel. Ainsi, selon le produit commercial en question, les insecticides domestiques à base de méthoxychlore ne sont plus utilisés depuis le 31 décembre 2004 ou le 31 décembre 2005 (Agence de réglementation de la lutte antiparasitaire, 2004a).

Tout comme les insecticides en aérosols manuels, les insecticides liquides (en brumisateurs) ont un rendement limité à l'extérieur. Les brumisateurs s'avèrent également complexes d'utilisation (University of California - Division of Agriculture and Natural Resources, 1998). Les insecticides destinés à être pulvérisés par les brumisateurs doivent parfois être dilués, ce qui nécessite une manipulation directe d'insecticides liquides. Les brumisateurs exposeraient ainsi davantage les utilisateurs à des risques d'intoxication. Il en est de même à la suite d'un mauvais dosage, par lequel la teneur en substances actives qui est vaporisée pourrait être trop élevée. De plus, certains des ingrédients actifs, tels que le propoxur et le méthoxychlore, présentent un risque pour la santé humaine.

2.2.1.3 Produits à la citronnelle

L'huile de citronnelle est l'ingrédient actif de ces produits où, par un processus de combustion, une fumée insecticide est engendrée. Conçus pour une utilisation extérieure, les produits à la citronnelle sont vendus sous différentes formes, telles que chandelles, torches et lampes à l'huile.

Ces produits sont utiles lorsque qu'il n'y pas de vent. Leur rendement est un peu moins élevé que les insectifuges personnels appliqués sur le corps ou les vêtements (American Mosquito Control Association, 2004). Sanfaçon *et al.* (2002) ont compilé les résultats d'efficacité de certains de ces produits. Cette efficacité n'est pas clairement démontrée puisque des conclusions contradictoires ont été obtenues par ces études. Aucune nouvelle donnée n'a été recensée dans la littérature.

2.2.1.4 Spirales et torches insecticides

Les spirales sous forme de serpentins et les torches en forme de bâtons sont à base de pyréthrinoïdes de même concentration. Conçus selon le principe de l'encens, ces produits brûlent sans flamme et dégagent une fumée insecticide. Pour un maximum d'efficacité, les spirales et les torches doivent être utilisées à l'extérieur, dans des endroits où il y a de faibles brises (terrasse couverte, véranda, etc.). Elles ne sont pas recommandées pour les endroits confinés ou non aérés (Sanfaçon *et al.*, 2002). Aucune nouvelle donnée sur l'efficacité de ces produits n'a été recensée dans la littérature.

2.2.2 Profil toxicologique des ingrédients actifs

Un profil toxicologique des principales substances actives contenues dans les insecticides domestiques disponibles sur le marché québécois a été tracé par Sanfaçon *et al*. (2002) afin d'apprécier les risques pour la santé humaine. Ces renseignements ont été mis à jour à partir des travaux de Samuel et St-Laurent (2005). En ce qui concerne le profil toxicologique de l'huile de citronnelle, il se trouve quant à lui à la section 2.1.2.3 du présent document, où il est question d'insectifuges personnels. Le tableau 2.6 présente pour sa part les principaux symptômes occasionnés par ces substances actives.

2.2.2.1 Pyréthrines et pyréthrinoïdes

Chez l'humain, l'inhalation de pyréthrines peut causer divers symptômes, lesquels se traduisent notamment par des maux de gorge, des maux de tête, de la dyspnée, des étourdissements, un souffle court, une toux, un écoulement ou une congestion des voies nasales, une douleur à la poitrine, des sensations de brulures oculaires, des conjonctivites ainsi que des rougeurs, des enflures et des irritations au niveau des paupières. Quant au contact de ces substances avec la peau, elles peuvent provoquer des irritations, des démangeaisons ou des cloques (National Pesticide Telecommunications Network, 1998).

Selon Samuel et St-Laurent (2005), les données chez les humains démontrent qu'il n'y aurait pas de relation entre les produits modernes à base de pyréthrines et des effets nocifs sur la santé. Un groupe d'experts de l'OMS a conclu que l'augmentation de l'incidence des tumeurs associée à l'exposition aux pyréthrines était un phénomène de seuil d'une pertinence négligeable en rapport avec les faibles taux auxquels les humains sont exposés. Par conséquent, aucune classification n'a été établie. L'US EPA a classé les pyréthrines comme ayant une évidence suggestive de cancérogénicité, mais insuffisante pour évaluer leur potentiel cancérigène chez l'humain (Samuel et St-Laurent, 2005).

Tableau 2.6 Principaux symptômes occasionnés chez l'humain par les substances actives contenues dans les produits insecticides domestiques

Insecticide domestique	Cas humain d'intoxication	Symptôme	Toxicité chronique
Pyréthrines	Oui	Maux de gorge, maux de tête, dyspnée, étourdissements, souffle court, toux, écoulement ou congestion des voies nasales, douleur à la poitrine, sensations de brulures oculaires, conjonctivites, irritations cutanées.	• Aucune classification n'a été établie par l'OMS.[1] • Selon l'US EPA, classées comme ayant une évidence suggestive de cancérogénicité, mais insusffisante pour évaluer leur potentiel cancérigène chez l'humain.[1]
Pyréthrinoïdes	Oui	Sensations de brulure, de picotement, de démangeaison et d'engourdissement, maux de tête, fatigue, diarrhée, vomissements.	• Aucune donnée. • Selon l'IARC, non classé comme cancérigène chez l'humain.[2]
Butoxyde de pipéronyle	Aucun cas rapporté	Légère irritation des yeux, nausées, diarrhée, vomissements, perte d'appétit et légère dépression du système nerveux central chez l'animal.	• Selon l'US EPA, il s'agit d'un cancérigène possible chez l'humain (classe C).[3]
Propoxur	Oui	Nausées, vomissements, crampes abdominales, diarrhée, fatigue, faiblesse, constriction de la poitrine, vision trouble, perte de coordination, incontinence, convulsions, coma, mort.	• Inhibiteur de cholinestérases de toxicité moyenne.[1] • Cancérigène probable chez l'humain (classe B2).[1]
Méthoxychlore	Aucun cas rapporté	Chez l'animal : faiblesse, dépression du système nerveux central, tremblements, convulsions, diarrhées.	• Défini par l'US EPA comme étant non classable comme cancérigène chez l'humain et ce, en raison de l'absence de donnée sur le sujet.[4]

1 Samuel et St-Laurent (2005)
2 WHO/IPCS (2001) [tiré de Sanfaçon *et al.*, 2002]
3 Valcke *et al.* (2005)
4 US EPA (2000)

En ce qui a trait aux pyréthrinoïdes, de manière générale, elles peuvent induire chez l'humain des cas de paresthésie[11], soit l'effet le plus fréquemment décrit suite à une exposition cutanée à ces produits (Samuel et St-Laurent, 2000), ainsi que d'autres symptômes tels que des maux de tête et de la fatigue (Centers for Disease Control and Prevention, 2000).

L'alléthrine, ainsi que ses isomères font partie des pyréthrinoïdes de synthèse que l'on retrouve le plus fréquemment dans les insecticides domestiques. Elle est modérément toxique par ingestion et peut causer les symptômes suivants : étourdissements, maux de tête, nausées, vomissements, anorexie, fatigue et faiblesses. Il n'y a pas de données rapportées sur la toxicité de l'alléthrine chez l'humain et ce, malgré l'étendue de son utilisation parmi les nombreux produits insecticides sur le marché depuis des années (Samuel et St-Laurent, 2005).

Une étude portant sur la toxicité des émissions produites par les spirales insecticides à base d'un isomère de l'alléthrine soulève que la combustion d'une seule spirale pouvait relâcher autant de particules de 2,5 mm que celles occasionnées par la fumée de 75 à 137 cigarettes (Liu *et al*., 2003). Selon ces mêmes auteurs, la quantité de formaldéhyde produite lors de la combustion d'une spirale était semblable à celle engendrée par la fumée de 51 cigarettes. Ces résultats viennent appuyer l'importance de ne pas utiliser les spirales insecticides dans un endroit clos.

2.2.2.2 Butoxyde de pipéronyle

Le butoxyde de pipéronyle (PBO) est ajouté à certains insecticides en tant que synergiste. Il s'agit d'un produit peu toxique (Valcke *et al*., 2005). Selon les mêmes auteurs, il est peu probable qu'une exposition orale ou cutanée produise des signes ou des symptômes significatifs d'intoxication systémique ou d'irritation cutanée. Ce produit peut être légèrement irritant pour les yeux. Seule l'ingestion d'une quantité élevée du produit est susceptible de produire des nausées, de la diarrhée, des vomissements, une perte d'appétit ou une légère dépression du système nerveux central chez l'animal (Valcke *et al.*, 2005). Puisque le PBO n'est jamais utilisé seul, mais bien toujours avec des pyréthrinoïdes, il n'y a pas de cas d'intoxication humaine qui y soient spécifiquement reliés (Valcke *et al.*, 2005). Selon l'US EPA, le PBO est un cancérigène possible chez l'humain (classe C) (Valcke *et al.*, 2005).

2.2.2.3 Propoxur

Plusieurs cas d'intoxication au propoxur ont été répertoriés chez les humains. Appartenant à la classe des carbamates, cet insecticide peut causer des signes classiques d'inhibition des cholinestérases[12]. En effet, ces signes sont nombreux et peuvent se manifester par différents

[11] La paresthésie est un trouble de la sensibilité qui se traduit par la perception de sensations anormales surtout au niveau du visage. Les symptômes les plus souvent rapportés sont une sensation de brulure, de picotement, de démangeaison, de fourmillement et d'engourdissement (Samuel et St-Laurent, 2000).

[12] Il s'agit d'enzymes présentes dans les muscles, le tissu nerveux et le sang. Ces enzymes ont pour rôle d'inactiver le transmetteur chimique libéré par les terminaisons nerveuses (acétylcholine).

symptômes, incluant : nausées, vomissements, crampes abdominales, diarrhée, salivation et sudation excessives, fatigue, faiblesse, rhinorrhée, constriction de la poitrine, vision trouble, myosis, larmoiements, perte de coordination, difficulté d'élocution, fasciculations musculaires, difficulté respiratoire, cyanose, mouvements incontrôlés, incontinence, convulsions, coma et mort . Un comité de l'US EPA a déterminé que le propoxur devrait être classé comme un cancérigène probable chez l'humain (Classe B2). De plus, des études semblent démontrer que le propoxur induit un retard de développement de certains réflexes et une atteinte du système nerveux central chez les rats à la suite d'une exposition prénatale (Samuel et St-Laurent, 2005).

2.2.2.4 Méthoxychlore

Les informations relatives au profil toxicologique du méthoxychlore sont rares, voire même inexistantes en ce qui concerne les effets sur les humains. Néanmoins, il est connu que le méthoxychlore peut provoquer chez les animaux divers symptômes tels que faiblesse, dépression du système nerveux central, tremblements, convulsions et diarrhées. De plus, le méthoxychlore et ses métabolites auraient des effets néfastes sur le système endocrinien. Entre autres, ils agiraient en tant que mimétiques de l'œstrogène (Samuel et St-Laurent, 2005).

2.2.3 Synthèse des insecticides domestiques

L'efficacité des insecticides domestiques disponibles sur le marché dans le contrôle des moustiques s'avère généralement plutôt restreinte. En effet, le rendement de plusieurs produits destinés à l'usage extérieur (ex. : aérosols manuels, brumisateurs, spirales, chandelles à la citronnelle) peut se voir limité notamment par la présence de vents légers. Quant aux produits destinés pour un usage intérieur (ex. : aérosols manuels, aérosols avec pulvérisateurs à piles), ils peuvent s'avérer efficaces pour réduire le nombre d'insectes, mais de manière non spécifique. Les principaux avantages des aérosols manuels sont l'application rapide d'insecticides, le peu de matériel requis et l'effet immédiat sur les moustiques, Par contre, l'efficacité de ces produits n'est que de courte durée. L'utilisation d'insecticides liquides (brumisateurs) est pour sa part complexe puisqu'ils doivent être parfois dilués.

Comme les aérosols manuels et avec pulvérisateurs à piles ne nécessitent pas de manipulation directe avec l'insecticide, cela implique un risque d'exposition moindre pour les utilisateurs, dans la mesure où ils sont utilisés au bon endroit. Toutefois, la prudence est de rigueur afin de s'exposer le moins possible aux vapeurs d'insecticides émises. Les insecticides des brumisateurs doivent parfois être dilués, ce qui nécessite une manipulation directe des produits. Cette manipulation directe des insecticides exposeraient davantage les utilisateurs à des risques d'intoxication. De plus, certains des ingrédients actifs, tels que le propoxur et le méthoxychlore, présentent un risque pour la santé humaine. D'ailleurs, tous les insecticides liquides à base de méthoxychlore ne peuvent plus être utilisés depuis le 31 décembre 2005 avec la fin de l'homologation de ces produits par l'ARLA.

2.3 ALTERNATIVES TECHNOLOGIQUES

Les alternatives technologiques sont considérées comme étant les divers procédés, méthodes et appareils qui fournissent une protection contre les piqures de moustiques ou qui permettent de réduire leurs populations par leur capture, leur destruction ou par le fait de les éloigner des humains. Il est à noter que les vêtements spécialisés dans la protection contre les insectes piqueurs (vêtements imprégnés d'insectifuges ou d'insecticides, les filets de tête ou vêtements avec filets) ne sont pas traités dans cette section.

Une revue des différentes alternatives technologiques disponibles sur le marché québécois à l'été 2004 a été réalisée. Pour ce faire, différentes banques d'articles scientifiques (Biosis, BioOne, Biological Abstract et Medline) ainsi que plusieurs moteurs de recherche Internet ont été utilisés pour recueillir de l'information sur les alternatives existantes. Des magasins ont également été visités.

Les producteurs de toute méthode, appareil, ou autre produit faisant état de contrôle des moustiques, de réduction des piqures ou de propriétés insectifuges, doivent en faire la démonstration auprès de l'ARLA, d'ici 2007. Des preuves scientifiques concluantes permettront au producteur d'obtenir une homologation fédérale de son produit et ainsi d'afficher ouvertement les propriétés ayant été scientifiquement prouvées. En raison de ces exigences, certaines des alternatives présentées ne seront possiblement plus disponibles sur le marché canadien au cours des prochaines années. D'autre part, les fabricants de plusieurs de ces produits contournent la réglementation en évitant d'utiliser certains mots (par exemple « contrôle » ou « protection ») dans leur publicité ou dans la description qu'ils font de leurs produits. Ainsi, ils n'ont pas à fournir de preuves scientifiques de l'efficacité de ce dernier, ce qui, dans certains cas, serait à la fois coûteux et compliqué.

Les différentes alternatives technologiques étudiées peuvent être classées selon qu'elles éloignent les moustiques, qu'elles attirent les moustiques dans un piège en vue d'entraîner leur mort (soit par électrocution, par dessiccation, par noyade ou grâce à l'utilisation d'un substrat collant) ou qu'elles visent la mort des moustiques par contact avec une surface.

2.3.1 Alternatives pour éloigner les moustiques

Les appareils émettant des ultrasons et ceux dégageant un insectifuge figurent parmi les alternatives qui permettent d'éloigner les moustiques.

2.3.1.1 Appareils émettant des ultrasons

Il existe plusieurs types d'appareil qui, d'après la publicité, repousseraient les moustiques femelles par l'émission de sons inaudibles à l'oreille humaine (ultrasons). Au Québec, ces d'appareils sont disponibles depuis plus de 50 ans. On les retrouve aujourd'hui dans les boutiques spécialisées comme dans les magasins à grande surface. La majorité des modèles fonctionnent à l'électricité ou encore à l'aide de piles alcalines. Les dispositifs électriques, qui sont censés avoir un rayon d'action de quelques mètres, doivent être

déposés près d'un lieu que l'on veut exempt de moustiques, alors que ceux avec des piles sont portés sur soi.

Les producteurs de ces appareils expliquent leur efficacité par le message confondant que les ultrasons envoient aux moustiques. Ces dispositifs devraient faire fuir les moustiques en produisant un son qui imite le bruit des battements d'ailes d'une libellule ou d'une chauve-souris, reconnus comme des prédateurs de moustiques, ou encore en émettant un son reproduisant le bruit du battement des ailes d'un moustique mâle cherchant à repousser une femelle déjà fécondée.

Malheureusement, les publications scientifiques rapportant les résultats d'essais avec ce type d'appareil indiquent que ces derniers n'ont aucune efficacité en termes de protection contre les piqures de moustiques (Coro et Suarez, 2000). Des tests sur le terrain ainsi qu'en laboratoire ont été conduits au Canada (Lewis *et al.*, 1982; Helson et Wright, 1977) et ailleurs (Jensen *et al.*, 2000; Foster et Lutes, 1985). Lors de ces expériences, l'efficacité de plusieurs fréquences d'ultrasons a été vérifiée contre de nombreuses espèces de moustiques, mais tous ces tests (au total, 16 études, 11 appareils et 24 espèces) ont démontré de façon significative une absence de protection contre les piqures de moustiques. Chez les moustiques, le mâle a un système auditif très développé qui lui permet de détecter le son qu'émettent les femelles pour les attirer en vu de s'accoupler (Clements, 1999). Ces dernières ne sont toutefois pas munies d'une telle acuité sensorielle et, sachant que ce sont elles qui piquent, leur perception des sons peu développée explique peut-être en partie l'inefficacité des dispositifs ayant recours à des ultrasons pour prévenir les piqures chez les humains.

Aucune publication n'a été recensée concernant l'impact de ces ultrasons sur la santé humaine ou l'environnement.

Les coûts de ces appareils varient de quelques dollars jusqu'à 125 $. Les modèles les plus dispendieux sont, selon les dires de leurs fabricants, plus puissants et pourraient repousser une grande variété d'animaux nuisibles, des moustiques aux fourmis jusqu'aux rats.

2.3.1.2 Appareils dégageant un insectifuge

Depuis quelques années, une panoplie de dispositifs dégageant un insectifuge sur une période de temps variable se trouve sur le marché. D'après la publicité, ces effluves répulsifs offriraient une protection adéquate contre les piqures de moustiques pour une durée variant de quelques semaines à plusieurs mois. Aucun de ces appareils n'est homologué ou certifié par l'ARLA. Les fabricants devraient donc démontrer scientifiquement l'efficacité de ces produits pour supporter leurs affirmations concernant l'efficacité, le rayon d'action et la durée de la protection offerte par ces appareils.

Certains des appareils offrant une protection à long terme existent sous des formes permettant de les transporter facilement (bracelets, timbres collants, boutons, colliers, etc.) de manière à pouvoir se protéger tout en se déplaçant. D'autres dispositifs permettent plutôt

la volatilisation d'un nuage de répulsif à l'aide d'une source de chaleur et la diffusion de l'insectifuge autour de l'appareil par ventilation. Ces derniers fonctionnent à l'électricité ou encore avec des piles alcalines ou solaires et agissent, toujours selon les publicités, dans un rayon d'environ 5 à 7 mètres autour de l'appareil. Ces appareils sont mis en marche lorsqu'une protection est requise.

Ces différents appareils fonctionnent essentiellement avec le même principe, soit la libération lente d'un produit insectifuge. La diffusion dans l'air de l'ingrédient actif offre alors, en principe, une protection contre les piqures de moustiques en éloignant ces derniers. En général, le nom de l'ingrédient actif utilisé n'est pas indiqué par le fabricant. Dans les cas contraires, des huiles naturelles ou certains de leurs dérivés comme le linalool, le géraniol et la citronnelle sont souvent présentés comme étant l'ingrédient miracle faisant fuir les moustiques. Ces produits ont effectivement très bonne réputation auprès du public, tant en raison de leur odeur agréable que de leur capacité prétendue à éloigner les moustiques. Dans le cas des colliers et des bracelets odorants, la citronnelle et le DEET constituent généralement l'ingrédient actif rebutant les moustiques lorsqu'il est mentionné par le fabricant.

En raison des exigences de l'ARLA (tel qu'indiqué au début de la section 2.3), plusieurs de ces appareils disparaissent peu de temps après leur apparition. Il est également fréquent que leurs noms commerciaux changent d'une saison à l'autre; le fabricant en profite alors pour modifier la couleur et la forme de l'appareil. En partie à cause de cette précarité, il semble que les chercheurs ne soient pas intéressés à tester scientifiquement ces appareils. La littérature sur le sujet est d'ailleurs, à toutes fins pratiques, inexistante. Selon Jensen *et al.* (Jensen *et al.*, 2000), un bracelet contenant du DEET offre une protection uniquement au niveau du membre portant le bracelet. Les insectifuges utilisés dans ces appareils auraient un faible pouvoir de diffusion et par conséquent, sont incapables de protéger adéquatement une personne qui porte un seul bracelet ou un collier. Aucune documentation supplémentaire concernant l'efficacité de cette alternative n'a été trouvée dans le cadre de cette recherche. En raison du principe de fonctionnement de ces appareils, il est possible de penser que le vent aura un effet très déterminant sur leur efficacité. Les personnes en dehors du nuage d'insectifuge créé par l'appareil risquent de ne bénéficier d'aucune protection.

Aucune donnée concernant les dangers que pourraient représenter ces dispositifs pour la santé humaine et l'environnement n'a été retrouvée dans la littérature scientifique consultée. Les nombreuses mises en garde concernant l'utilisation d'insectifuges applicables sur la peau qui sont homologués par l'ARLA (section 2.1.8) donnent cependant lieu de porter une attention particulière aux ingrédients actifs utilisés pas ces types d'appareils.

Les prix de ces appareils varient de quelques dollars à près de 50 $. Les modèles plus dispendieux sont ceux prévus pour une utilisation stationnaire qui sont munis d'un système électrique pour chauffer et vaporiser l'insectifuge et, dans bien des cas, d'un petit ventilateur servant à diffuser le répulsif chimique dans l'air. De plus, l'élément contenant le principe actif doit être remplacé à un intervalle de temps variant généralement de deux à quatre semaines dépendamment de l'utilisation qui est faite de l'appareil ce qui peut entraîner des dépenses

substantielles en cours de saison (il en coûte de 10 $ à 30 $ par remplacement). Les modèles portables sont habituellement moins dispendieux, mais le remplacement régulier des piles entraîne également un coût d'utilisation à prévoir.

2.3.2 Alternatives pour attirer et tuer les moustiques

Parmi les alternatives qui attirent les moustiques dans un piège en vue d'entraîner leur mort, les pièges électrocuteurs et les pièges attractifs sont décrits dans les sections suivantes.

2.3.2.1 Pièges électrocuteurs

Le principe régissant le fonctionnement des pièges électrocuteurs, communément appelés « zappers » consiste à attirer les moustiques vers un grillage électrifié. Une lumière ultraviolette est généralement utilisée pour attirer les moustiques (et de nombreux autres insectes nocturnes par le fait même). La chaleur que dégagent ces appareils a également un pouvoir attrayant sur les insectes. Lorsque ceux-ci s'approchent de la lumière, ils entrent en contact avec une grille sous tension située à la périphérie de la source lumineuse. Les moustiques et les autres insectes piégés sont alors électrocutés instantanément.

Les rares études effectuées sur les pièges électrocuteurs ont démontré qu'ils ne tuent que très peu de moustiques et qu'ils ne réduisent pas le taux de piqures (Nasci *et al.*, 1983). Plusieurs recherches indiquent que ces appareils ne sont pas sélectifs, car un grand nombre d'espèces d'insectes, dont plusieurs considérées comme bénéfiques ou utiles, y périssent. Une étude réalisée en Ontario dans les années 70 a démontré que moins de 0,5 % des insectes tués dans ces pièges étaient des moustiques (Surgeoner et Helson, 1977). Frick et Tallamy (1996) rapportent quant à eux que les pièges électrocuteurs utilisés dans leurs travaux ont permis la capture de plus de 104 familles d'insectes non ciblées, alors que les moustiques ne comptaient que pour 0,22 % des captures totales (Frick et Tallamy, 1996).

Le prix des pièges électrocuteurs varie de 75 $ à plus de 200 $. Certains modèles vont même jusqu'à utiliser la chaleur produite par l'appareil pour vaporiser un produit particulier augmentant ainsi le pouvoir d'attraction de l'appareil. Dans ces cas, l'attractant, qui coûte aux alentours de 25 $, doit être changé régulièrement ce qui ajoute aux frais encourus par l'utilisation de ce genre d'appareil.

2.3.2.2 Pièges attractifs

Les pièges attractifs existent depuis une centaine d'années. En recherche, ils sont notamment utilisés pour suivre l'évolution des populations de moustiques dans le temps, pour identifier les espèces présentes dans une région donnée ou pour évaluer le niveau d'infection des espèces capturées. Les pièges utilisés en recherche ne sont cependant pas vendus comme outil de prévention des piqures ou de contrôle des populations de moustiques. Le principe d'action de ces pièges a néanmoins été repris par certaines compagnies qui ont développé des modèles adaptés aux besoins de protection des particuliers contre les moustiques. Depuis l'apparition du VNO en Amérique du Nord en 1999, le développement et la promotion des pièges attractifs ont donc connu une ascension

fulgurante. Les modèles en vente sont aujourd'hui nombreux et se veulent, en principe, plus simple à utiliser. Ils ont une configuration et un mode de fonctionnement très variables.

La majorité des pièges attractifs fonctionne en imitant la respiration humaine. Pour ce faire, du gaz carbonique est libéré de façon continue ou pulsée afin d'attirer les moustiques femelles. En effet, dans les conditions naturelles, le dioxyde de carbone émis par l'hôte potentiel guide la femelle moustique dans le choix d'un hôte approprié pour obtenir un repas sanguin, ce qui explique l'attractivité des dispositifs fonctionnant de la sorte. Lorsqu'un moustique s'approche suffisamment du piège, un aspirateur fonctionnant de façon continu l'entraîne vers sa mort. Selon les appareils, diverses méthodes sont utilisées pour tuer le moustique aspiré. Certains reposent sur la dessiccation de l'insecte indésirable (les moustiques y sont très sensibles et meurent rapidement), sur la noyade ou sur l'électrocution du moustique en le faisant entrer en contact, dans ce dernier cas, avec une grille électrifiée. Enfin, d'autres systèmes prévoient plutôt projeter le moustique sur une surface collante dont il ne pourra se libérer.

Les bonbonnes de gaz propane étant faciles à se procurer, la plupart des pièges produisent le gaz carbonique grâce à la combustion de ce gaz en présence d'un catalyseur métallique. Cette revue a également permis de relevé un modèle d'appareil reposant sur une autre réaction chimique pour produire le gaz désiré et un autre utilisant directement une bonbonne de gaz carbonique évitant ainsi la transformation catalytique du propane. Dans chacun des cas, la diffusion du gaz carbonique est facilitée par un ventilateur alimenté à l'électricité dans la plupart des appareils. Certains font plutôt l'usage de piles marines qu'il faut recharger régulièrement, alors que les modèles les plus dispendieux s'en remettent à des panneaux solaires. Pour la majorité des modèles, une source de lumière ultraviolette de faible intensité ainsi qu'un dispositif permettant la volatilisation d'une substance chimique attractive sont inclus de manière à augmenter l'efficacité du piège. Le produit chimique émis est l'octénol, un composé qui, en général, attire plus de moustiques vers le piège lorsque combiné avec le gaz carbonique (Kline *et al*., 1990). Comme ces éléments sont tous reconnus pour attirer les moustiques femelles en quête d'un repas de sang, ces pièges agissent donc de façon plus spécifique.

Les publications scientifiques se rapportant à l'efficacité de capture de ces pièges indiquent que ces derniers capturent généralement les moustiques en grand nombre (Sithiprasasna *et al*., 2004; Kline, 2002). L'efficacité de ces pièges est néanmoins affectée par les mêmes paramètres que les autres pièges reposant sur l'émission de substances volatiles pour attirer ou éloigner les moustiques. Ainsi, les conditions climatiques risquent d'affecter grandement l'efficacité de capture des pièges attractifs. Un vent léger fera donc en sorte que le nuage attractif sera dispersé dans une direction et non pas tout autour du piège, ce qui aura pour conséquence que seule une partie de la population de moustiques sera attirée vers le piège. Les publicités sur ce genre de piège prétendent que ces appareils peuvent capturer des moustiques sur une surface allant de 10 000 m^2 à plus de 35 000 m^2, ce qui correspond environ à un rayon d'action de 100 à 200 m autour de la source. Cette variation provient principalement des différences au niveau de la quantité de gaz carbonique et d'attractant dégagée par les différents appareils ainsi que de la puissance du tube lumineux.

Plusieurs s'entendent pour dire que ces pièges peuvent être efficaces dans des conditions idéales, mais qu'ils ne constituent qu'une partie des protections nécessaires pour lutter adéquatement contre le VNO (R. Lindsay, 2004). Bien que les pièges attractifs aient la capacité de capturer des moustiques (le principe étant qu'une réduction du nombre de moustiques femelles réduira la quantité d'œufs pondus et, par conséquent, moins de moustiques émergeront des mares et, par le fait même, les probabilités de se faire piquer seront réduites), les nombreuses conditions gouvernant leur efficacité sont telles qu'il est permis de questionner leur succès dans la prévention de la transmission du VNO. Par exemple, en présence d'humains, l'attractivité générée par le piège peut être insuffisante pour détourner la majorité des moustiques femelles de leurs cibles humaines. En effet, en plus de dégager beaucoup de gaz carbonique, les humains dégagent aussi de la chaleur et un grand nombre de composés volatiles attractifs. De plus, leurs mouvements et les couleurs attirantes qu'ils arborent sont aussi susceptibles d'attirer davantage les moustiques femelles que le piège. À cet effet, une étude a démontré que les pièges commerciaux capturaient presque autant de moustiques que les pièges scientifiques, mais beaucoup moins (de 5 à 30 fois) que l'attraction humaine (Sithiprasasna *et al.*, 2004).

Contrairement à la publicité, l'utilisation de ces dispositifs n'est pas aussi simple. En effet, il faut être en mesure de les placer au bon endroit sur son terrain en fonction de la direction du vent et de la provenance des moustiques. La variabilité des conditions climatiques pourrait d'ailleurs imposer de déplacer régulièrement les pièges. Par ailleurs, comme le mode d'utilisation indique que ces pièges doivent être utilisés de façon continue pour atteindre une efficacité maximale, ils doivent être entretenus régulièrement. La partie du piège où s'accumulent les cadavres de moustiques doit être nettoyée ou changée. Les bonbonnes et les plaquettes de produit attractif doivent également être remplacées fréquemment. Il faut donc prévoir beaucoup de temps pour faire fonctionner un piège attractif de façon adéquate et un budget relativement important. Le remplacement de certains items risque en effet de rendre le coût d'entretien de ces appareils, pour une seule saison, égal ou supérieur au prix d'achat.

Si les prix des pièges attractifs les moins dispendieux avoisinent les 350 $, les plus perfectionnés peuvent dépasser 1 500 $. Il s'agit donc d'une alternative onéreuse d'autant plus qu'à ces prix, il faut ajouter le coût du remplacement périodique de certains items. À titre d'exemple, les plaquettes d'octénol coûtent aux alentours de 30 $ et ne durent que trois semaines peu importe que l'appareil soit en marche ou non (l'octénol continue de diffuser même lorsque l'appareil est éteint). Il est à noter également que le fait d'avoir un brûleur au propane fonctionnant de façon continue à proximité de son logis peut présenter certains risques.

2.3.3 Alternatives pour tuer les moustiques par contact avec une surface

Une autre alternative technologique qui pourrait être utilisée comme moyen de protection personnelle concerne les appareils visant la mort des moustiques par contact avec une surface, soit les brumisateurs personnels ou de type maison. Les brumiseurs, communément appelés « foggers », existent sous plusieurs formes. Le texte qui suit concerne ceux conçus

pour une utilisation domestique. Les appareils commerciaux servant à traiter des grandes surfaces sont donc exclus de cette section.

2.3.3.1 Brumiseurs personnels ou de type maison

Le principe de fonctionnement des brumiseurs domestiques consiste à pulvériser une surface d'une brume formée de fines gouttelettes d'insecticides. Une pompe mécanique (électrique) ou à chaleur (fonctionnant au propane) est alors utilisée forçant la sortie de l'insecticide liquide à travers un petit orifice. Le propriétaire d'un terrain peut de cette manière procéder aisément à l'épandage de l'adulticide sur la végétation entourant sa maison ainsi que sur les autres surfaces où des moustiques sont susceptibles de se poser. Par simple contact avec le moustique, l'insecticide provoquera la mort de ce dernier en quelques minutes. La perméthrine et le malathion sont les adulticides les plus souvent utilisés. Ces traitements peuvent, s'ils sont effectués correctement, créer une barrière toxique limitant l'accès des moustiques à une zone dans laquelle ils ne sont pas souhaités.

Étant donné que les produits utilisés sont homologués par l'ARLA pour la lutte contre les moustiques adultes, les brumiseurs personnels s'avèrent donc efficaces pour tuer les moustiques. Cependant, l'efficacité de ces traitements comme moyen de protection contre les piqures suscite quelques interrogations. D'après les recommandations des fabricants, les produits adulticides ont perdu leur efficacité après deux ou trois jours (dans certains cas, on parle de cinq à six heures). Ces traitements doivent donc être répétés régulièrement pour une protection continue durant l'été.

D'autres recommandations concernent les conditions météorologiques devant prévaloir lors des pulvérisations. À cet effet, aucune pulvérisation ne devrait avoir lieu en présence de vents supérieurs à 7 km/h. Le fait de ne pas respecter cette condition limiterait l'efficacité des pulvérisations tout en risquant d'importuner les voisins (le nuage de brume risquerait alors d'être emporté par le vent avant qu'il ne se dépose sur la surface à traiter). Il importe également de ne pas procéder à l'arrosage s'il pleut ou si une averse est annoncée. Les gouttes de pluie laveraient l'adulticide ce qui obligerait de recommencer les pulvérisations.

Les prix de ces appareils sont relativement importants, variant de 75 $ à 300 $, alors que leurs coûts d'utilisation sont difficiles à évaluer étant donné l'utilisation sporadique qui en est généralement faite. Ce type d'appareils est mécaniquement complexe ce qui peut compliquer, par le fait même, leur fonctionnement et leur entretien par un utilisateur et entraîner des dépenses additionnelles.

Les répercussions sur l'environnement et la santé des adulticides utilisés avec les brumiseurs personnels sont nombreuses et font notamment en sorte que des mesures de sécurité particulières doivent être observées. Par exemple, il est important d'éviter que la brume d'adulticide ne se dépose sur un potager ou sur certaines espèces végétales particulièrement sensibles au produit utilisé. Il faut également éviter que les animaux domestiques entrent en contact avec les produits pulvérisés. En raison des nombreuses contre-indications concernant l'utilisation des brumiseurs personnels et étant donné que les

traitements doivent être répétés fréquemment, il s'avère que les désavantages occasionnés par leur recours dépassent les bénéfices en terme de protection contre les piqures de moustiques.

2.3.4 Synthèse des alternatives technologiques

Les recherches effectuées ont révélées la très grande disponibilité des alternatives technologiques sur Internet comparativement à ce qui se trouve en magasin. Relativement peu de littérature scientifique concernant l'efficacité de ces produits a été trouvée. Il semble que les chercheurs et les éditeurs de revues scientifiques soient peu intéressés par ce genre de recherche. Les prix sont extrêmement variables allant de 3 $ à 1 500 $.

Dans le cadre de la lutte contre le VNO, il est très difficile de recommander l'une ou l'autre des alternatives décrites précédemment comme moyen de protection personnelle contre les piqures de moustiques. En ce qui a trait aux alternatives qui sont supposées éloigner les moustiques, les ultrasons ne sont d'aucune efficacité alors que les appareils dégageant un insectifuge ont une efficacité limitée pour la prévention des piqures. Concernant les alternatives qui attirent les moustiques dans un piège en vue d'entraîner leur mort, les pièges électrocuteurs ne sont pas sélectifs et ne capturent que très peu de moustiques. Enfin, les brumiseurs personnels, qui constituent une alternative pour tuer les moustiques par contact avec une surface, ils sont complexes d'utilisation et utilisent des produits qui peuvent être nocifs pour la santé humaine et l'environnement.

Des alternatives étudiées, les pièges attractifs apparaissent comme étant les plus intéressants. Dans des conditions idéales, ces dispositifs sont en effet relativement efficaces pour capturer des moustiques et sont considérés comme n'ayant pas d'effet sur l'environnement et sur les humains. Toutefois, ils ne constituent qu'une partie des protections nécessaires pour lutter adéquatement contre le VNO. D'ailleurs, des études ont démontré qu'une personne attirait beaucoup plus de moustiques que ces pièges, limitant de ce fait leur pouvoir d'attraction pour détourner la majorité des moustiques femelles de leurs cibles humaines. De plus, les coûts d'achat, d'utilisation et d'entretien de ces appareils laissent supposer que peu de gens s'en serviraient de façon quotidienne pour réduire les populations de moustiques autour de leur maison.

2.4 HABITUDES DE VIE ET ENTRETIEN DU MILIEU ENVIRONNANT

Des habitudes de vie peuvent être également adoptées par les citoyens afin de prévenir les piqures de moustiques et, par le fait même, de minimiser le risque d'être infecté par le VNO. Pour ce faire, la population doit être informée par les autorités de santé publique des mesures de protection personnelle à prendre pour se protéger des piqures ainsi que pour réduire le nombre de sites de reproduction de moustiques dans leur environnement domestique. Les sections qui suivent dressent donc un portrait des mesures qui sont généralement recommandées, soit l'utilisation d'un insectifuge personnel (chasse-moustiques), le port de vêtements adéquats, la pratique des activités extérieures plus restreintes aux heures où les moustiques sont plus actifs, la vérification de l'étanchéité des

moustiquaires, ainsi que l'élimination des gites de reproduction des moustiques dans le milieu environnant.

2.4.1 Utilisation d'un insectifuge personnel

L'utilisation d'un insectifuge personnel (chasse-moustiques), homologué au Canada par l'ARLA, est sans contredit la principale recommandation formulée par les autorités de santé publique pour prévenir plus efficacement les piqures de moustiques à l'occasion des activités extérieures. L'application d'une petite quantité d'insectifuge sur les vêtements ou les parties du corps non protégées par les vêtements permet de repousser les moustiques grâce aux ingrédients actifs qui sont contenus dans les insectifuges (Sanfaçon *et al.*, 2002). Tel que décrit à la section 2.1, l'efficacité et la durée de protection varient en fonction des produits utilisés, de la personne, du lieu où utilise le produit et du moment de la journée. Pour faire un bon usage du produit et minimiser les effets indésirables potentiels d'un insectifuge, l'utilisateur est invité à bien lire l'étiquette du contenant et de respecter les consignes d'utilisation imprimées.

Il faut par ailleurs se méfier des mythes ou des remèdes qui peuvent circuler à propos de divers chasse-moustiques que certaines personnes pourraient être portées à utiliser comme alternative aux insectifuges personnels. Il s'agit notamment de l'utilisation de feuilles d'assouplissant, de la consommation de certains aliments repoussant les moustiques (par exemple, l'ail) ou les attirant (par exemple, les bananes), de la consommation de la vitamine B1 et de l'utilisation de certains produits de soins pour la peau. Aucune étude scientifique n'a prouvé l'efficacité de ces moyens pour éviter les piqures de moustiques (Bourassa et Boisvert, 2004; Gouvernement de l'Ontario, 2003; Fradin et Day, 2002; Fradin, 1998). L'utilisation d'un insectifuge personnel homologué par l'ARLA demeure le moyen le plus efficace à préconiser.

Quelques études épidémiologiques portant sur l'efficacité des moyens de protection personnelle en termes de protection contre l'infection au VNO ont été réalisées. Lors d'une étude réalisée en Alberta (Ivan *et al*., 2005), on a observé, parmi les personnes qui ont rapporté toujours utiliser des insecticides contenant du DEET, une tendance à l'effet que celles-ci étaient vraisemblablement moins souvent victime d'une infection par le VNO. Cependant, cette association n'a pas atteint un seuil significatif d'un point de vue statistique. La présence dans le sang d'anticorps dirigés contre le VNO a pour sa part été associée à la pratique de moins de deux mesures de protection personnelle lors d'une étude menée à Oakville en Ontario (Elliott *et al*., 2003). L'étude ne précise pas cependant s'il s'agit d'une relation statistiquement significative. L'étude de Mostashari *et al*. (2001) a permis de constater que parmi les personnes qui ont séjourné à l'extérieur pendant plus deux heures après le crépuscule ou avant l'aube (n=223), celles qui ont utilisé un insectifuge à base de DEET ont un taux de séroprévalence plus faible (1,3 %, soit 1/93) que celles qui n'en ont pas fait usage (6 %, soit 8/130). La taille des échantillons, en termes de nombre d'individus, était toutefois faible (Mostashari *et al*., 2001). Une autre étude réalisée en 2000 au Connecticut indique qu'aucune sérologie n'a été positive malgré une forte activité épizootique dans cette région. L'usage de répulsifs déclaré par les répondants était plus élevé que celui mesuré

dans l'étude de Mostashari *et al*. (2001). Presque tous les répondants prennent au moins une mesure de protection personnelle et 50 % d'entre eux ont mentionné qu'ils utilisaient un insectifuge (chasse-moustiques) « souvent » ou « toujours ». Il est difficile toutefois de préciser avec exactitude les effets des moyens de prévention de la population sur le risque d'infection observé (McCarthy *et al*., 2001).

En vue de tracer un profil des connaissances relatives aux moyens de protection personnelle ainsi qu'à leur mise en application par la population, Mostashari *et al.* (2001) ont aussi réalisé une étude auprès de 637 personnes à la suite de l'éclosion d'infection survenue à New York en 1999. À l'issue de cette étude, il est apparu que plus de 85 % des gens interrogés ont pu mentionner correctement au moins une mesure de protection contre les moustiques vecteurs de maladies. Par ailleurs, seulement 61 % ont affirmé avoir eu recours à l'une d'elles. Quant à l'utilisation d'insectifuges, les auteurs ont constaté que les taux d'utilisation d'insectifuges avant et après que l'épidémie ait été confirmée sont demeurés sensiblement les mêmes. Ces taux, qui étaient de 6 % (souvent utilisé), 23 % (rarement utilisé) et 71 % (jamais utilisé) avant l'épidémie, sont passés respectivement à 9 %, 21 % et 70 % et ce, malgré une campagne de sensibilisation (Mostashari *et al.*, 2001). À Toronto, sur les 509 répondants questionnés en 2003, seulement 12 % d'entre eux indiquaient qu'ils utilisaient du DEET toujours ou la plupart du temps lors de la pratique d'activités extérieures tandis que 71 % ne l'utilisaient presque jamais ou jamais (Yaffe, 2004). Aucun changement d'habitude n'a été observé depuis 2002.

Les sondages de Santé Canada de mai 2003 révèlent que le moyen de protection le plus connu est l'utilisation d'un chasse-moustiques (47 %), suivi du port de vêtements longs (19 %) (Decima Research, 2003). Ces sondages poursuivis en 2004 et en 2005 indiquent que plus de la moitié des Canadiens ont utilisé un insectifuge régulièrement ou à l'occasion au cours de la période estivale (Decima Research, 2005; Decima Research, 2004). Questionnés sur les raisons pour ne pas appliquer de mesures de protection personnelle contre les piqures de moustiques lors de sondages commandés par le MSSS, les répondants québécois ont invoqué ne pas être incommodés par les maringouins dans une proportion de 28 %, que l'endroit où ils sont situés n'est pas propice aux moustiques (20 %), qu'ils habitent en ville (13 %) qu'ils sortent peu ou pas aux heures où il y a des moustiques (10 %) ou encore qu'ils ne se sentent pas préoccupés par le problème (10 %) (Laliberté *et al*., 2005).

Des résultats semblables ont été obtenus pour le Québec. En effet, les données recueillies lors des sondages téléphoniques réalisés par le MSSS indiquent aussi que l'utilisation d'un chasse-moustiques constitue le principal moyen pour se protéger des piqures de moustiques. Le sondage d'octobre 2003 révélait que 42 % de la population a recours à un insectifuge (Laliberté *et al.*, 2005). Il est à noter cependant que les comportements de protection personnelle sont en lien direct avec le degré d'inquiétude. À ce sujet, une enquête réalisée sur les comportements et les risques perçus par la population dans des zones urbaines et rurales les plus exposées au VNO (Koné *et al*., 2005) révélait notamment qu'au cours des trois dernières années, 23 % des personnes interrogées affirment avoir modifié leurs habitudes par rapport aux moustiques lors d'activités extérieures; les raisons

principales étant la crainte du VNO et la nuisance occasionnée par la présence de moustiques. Afin de documenter la perception du risque, les facteurs de risque et les différentes pratiques préventives des populations selon la zone de résidence, 1 651 personnes ont été sondées par entretien téléphonique d'octobre à novembre 2004. À partir des résultats obtenus, aucune différence significative dans la perception du risque entre les personnes vivant en milieu urbain et le milieu rural n'a été constatée (Koné *et al*., 2005).

Les réponses obtenues lors d'un sondage effectué à l'été 2004 par la Société de protection des forêts contre les insectes et maladies (SOPFIM) ont permis de refléter que malgré les messages véhiculés, la présence du VNO et la connaissance des différentes actions qui peuvent être faites pour se protéger des moustiques, encore beaucoup de gens ne se soucient pas d'utiliser des moyens de protection personnelle (Société de protection des forêts contre les insectes et maladies, 2005c). Sur les 1 888 répondants, près de la moitié disent ne pas utiliser d'insectifuge.

2.4.2 Port de vêtements longs et de couleurs claires

Lors d'activités extérieures, le port de vêtements longs et de couleurs claires est au nombre des recommandations qui sont formulées par les autorités de santé publique pour se protéger des piqures de moustiques et ainsi réduire le risque de transmission du VNO (Gouvernement du Québec, 2005; Gouvernement de l'Ontario, 2004; Gouvernement du Québec, 2004d).

Cette mesure de protection a pour objectif de créer une barrière physique empêchant le moustique de piquer. Ainsi, le port de vêtements longs permet d'exposer le moins possible de surface cutanée aux moustiques. Quant aux vêtements de couleurs claires, ils attirent beaucoup moins les moustiques que les vêtements de couleurs foncées, telles que le rouge, le marine, le vert foncé et le noir, qui emmagasinent d'avantage de chaleur, laquelle est recherchée par les moustiques. Les moustiques perçoivent moins les radiations froides (Bourassa et Boisvert, 2004).

Selon les sondages téléphoniques réalisés par le MSSS, 29 % de la population se protègent des moustiques par le port de vêtements longs ou par l'utilisation de filets et de moustiquaires (Laliberté *et al.*, 2005). Les résultats de l'enquête effectuée sur 1 651 personnes habitant des zones urbaines et rurales indiquaient que la proportion de personnes qui portent des vêtements longs (57 %) est plus importante que celle qui utilise du chasse-moustiques (47 %) (Koné *et al*., 2005).

Le port de vêtements traités à la perméthrine fait partie des moyens efficaces pour se protéger des piqures de moustiques. Ils sont cependant surtout utilisés par les membres des Corps armés américains, du Royaume-Uni et de l'Allemagne, auquel s'ajoute l'utilisation topique de produits à base de DEET (Laliberté *et al.*, 2005). Bien que les membres du *Mosquito Surveillance and Control Subcommittee* (comité chapeauté par Santé Canada)

considèrent que cette option devrait être sérieusement envisagée, ce moyen de protection n'est pas disponible pour la population civile canadienne.

2.4.3 Réduction des activités extérieures à l'aube et au crépuscule

Les moustiques étant particulièrement actifs à la fin de l'après-midi, dès le coucher du soleil, de même qu'aux premières heures du matin et après une pluie (Bourassa, 2000), les autorités de santé publique recommandent de restreindre la pratique des activités extérieures durant ces périodes (Gouvernement du Québec, 2005; Gouvernement de l'Ontario, 2004; Ministère de la Santé et des Services sociaux, 2004). En effet, ces deux périodes correspondent à l'heure du repas sanguin de plusieurs espèces de moustiques vecteurs du VNO (Campbell *et al*., 2002).

Les réponses obtenues lors du sondage effectué par la SOPFIM à l'été 2004 indiquaient que sur les 1 530 répondants (81 %) qui connaissaient les périodes les plus critiques de l'activité des moustiques, seulement 12,4 % évitaient ces heures pour la pratique d'activités extérieures (Société de protection des forêts contre les insectes et maladies, 2005c). Les résultats de l'enquête effectuée sur des populations urbaines et rurales indiquaient que durant les trois dernières années précédant cette enquête, 23 % des répondants ont signifié avoir modifié leurs habitudes par rapport aux moustiques lors d'activités extérieures; les raisons principales sont la crainte du VNO et la nuisance (Koné *et al*., 2005).

2.4.4 Renforcement du système immunitaire

Lors d'un atelier et d'une rencontre d'information-rétroaction réalisés respectivement en septembre 2004 et en décembre 2005 (Chaussé, 2005), les représentants de différents groupes d'intérêt ont fait valoir qu'il pourrait être envisagé, comme alternative aux insecticides chimiques, de renforcer le système immunitaire des individus pour limiter le risque d'infection du VNO dans la population québécoise. Pour ce faire, il a été proposé que les individus devraient adopter un style de vie riche en exercice physique et comportant un régime alimentaire équilibré.

Des efforts et des investissements considérables seraient toutefois à prévoir par le MSSS pour la promotion de messages et de campagnes de sensibilisation et d'éducation. Par ailleurs, même si des efforts de sensibilisation pourraient être entrepris en ce sens, il incombe tout de même de la bonne volonté du citoyen à adopter ce style de vie afin d'améliorer son système immunitaire. Par ailleurs, cette intervention n'aurait pas vraiment d'incidence sur le risque d'infection par le VNO puisque des personnes en bonne santé peuvent aussi être infectée par le VNO comme en témoignent les diagnostics des cas asymptomatiques et avec symptômes modérés obtenus au cours des dernières années (voir rapport sectoriel 1; Aubé-Maurice *et al*., 2005).

2.4.5 Inspection des moustiquaires

Les autorités de santé publique recommandent aux citoyens de s'assurer que les moustiquaires installées aux fenêtres de la maison sont en bon état et qu'ils sont bien ancrés dans le cadre des fenêtres, pour que des moustiques ne puissent pas pénétrer à l'intérieur (Ministère de la Santé et des Services sociaux, 2004; Gouvernement de l'Ontario, 2003). En créant une barrière physique étanche qui obstrue l'entrée des moustiques à l'intérieur des habitations, le contact avec ces insectes s'en trouve diminué (Sanfaçon *et al.*, 2002). Cependant, il faut mentionner que le rôle des caractéristiques des résidences (par exemple, la présence ou l'absence de moustiquaires, de climatiseurs) comme facteur de risque de transmission du VNO semble plus ou moins bien défini à l'heure actuelle (Laliberté *et al.*, 2005).

2.4.6 Élimination des gites de développement larvaire péridomestiques

Le cycle vital des moustiques comprend un certain nombre de stades de développement (œuf, larve, nymphe). Ces stades se déroulent en milieu aquatique et se termine par une vie adulte en milieu terrestre. La plupart des moustiques déposent leurs œufs à la surface de l'eau. Les œufs et les larves peuvent se développer dans toute accumulation d'eau stagnante qu'elle soit d'origine naturelle (mare, tourbière, marécage) ou artificielle (pneu, récipient, bain d'oiseaux, gouttière) (Bourassa, 2000). En modifiant la structure ou les composantes physiques de milieux où prolifèrent les moustiques, il est possible de nuire au développement des formes immatures et d'empêcher l'apparition de moustiques adultes (Bourassa et Boisvert, 2004; Bourassa, 2000) et ainsi, de prévenir les piqures de moustiques.

Dans ce contexte, l'élimination de l'eau stagnante pouvant s'accumuler dans les objets et récipients autour de la propriété est une mesure de protection personnelle importante pour réduire le nombre de moustiques. Les propriétaires sont donc encouragés par les autorités de santé publique à éliminer les gites larvaires et à prendre des précautions individuelles contre les moustiques (Gouvernement du Québec, 2005; Ellis, 2004; Gouvernement de l'Ontario, 2004; Gouvernement du Québec, 2004d).

Parmi les conseils pratiques, il est suggéré notamment :

- d'enlever ou de renverser tout ce qui peut contenir de l'eau stagnante à l'extérieur (vieux pneus, chaudières, barils, jouets d'enfants, etc.) pour éviter que les moustiques s'y reproduisent;
- d'entretenir la piscine et d'éliminer l'eau qui s'accumule sur la toile la recouvrant;
- de couvrir les poubelles et installer une moustiquaire sur les réservoirs d'eau de pluie;
- d'enlever, pendant tout l'été, les feuilles mortes et les brindilles qui se sont déposées dans les gouttières et les descentes pluviales. Il faut veiller à ce que les fossés de drainage ne soient pas obstrués. Il faut inspecter fréquemment les toits plats pour voir s'il y a des eaux stagnantes;

- de remplir les petites dépressions des pelouses. Il faut éclaircir les arbustes à végétation dense de façon à favoriser la circulation de l'air, car ce sont des endroits où les moustiques aiment se reposer;
- de changer l'eau des bains d'oiseaux au moins une fois par semaine;
- de placer des poissons qui mangent les larves de moustiques dans les étangs décoratifs;
- d'encourager ses voisins à adopter de telles habitudes d'entretien.

Peu de données portant sur l'efficacité des mesures d'élimination des gites de reproduction sont disponibles. Le projet *Targeted Environmental Action Against Mosquitoes* (TEAAM), tenu en 2003 à Winnipeg, visait néanmoins à vérifier les conditions environnementales associées au développement larvaire. Parmi les personnes qui disaient avoir pris des mesures correctives sur leur terrain (79 %), seulement un propriétaire sur trois avait résolu correctement la situation problématique lors d'une inspection ultérieure sur place (Back et Lindsay, 2004 cité dans Yaffe, 2004). Les raisons de ce succès relatifs, telles qu'une mauvaise compréhension des directives ou une inefficacité des mesures, ne sont toutefois pas connues. Ces travaux ont également été repris en 2004.

Une étude menée à l'été 2004 par la SOPFIM visait à relever les sites potentiels de développement larvaire de moustiques du genre *Culex* (*Cx*) dans les cours arrière de résidences privées de la région métropolitaine de Montréal (Société de protection des forêts contre les insectes et maladies, 2005c). En complément à cette étude, les résidants étaient invités à répondre à un questionnaire qui avait pour but de vérifier les connaissances générales des gens sur la biologie des moustiques et sur le VNO. Au cours de cette enquête, plus de 3 000 résidences ont été visitées. Les principaux gites retrouvés étaient constitués de chaudières et barils, de pots de fleurs, de sacs de plastique, de baignoires d'oiseaux, de jouets et de pneus. Seulement 10 % des gites en eau répertoriés étaient colonisés par des larves de moustiques. Par ailleurs, l'identification des espèces présentes a révélé que les gites étaient colonisés en grande partie et pendant toute la saison par *Cx restuans* (*Cx pipiens* était aussi présent mais en plus faible proportion). Malgré qu'ils ne soient pas nécessairement les plus nombreux, les piscines mal entretenues, les pneus et les chaudières étaient les gites les plus colonisés. Ainsi, contrairement à ce qui était attendu, les cours arrière des résidences privées ne contiennent que très peu de gites colonisés et ne génèrent donc potentiellement que de faibles populations de moustiques adultes.

Les réponses obtenues par le sondage ont permis de révéler que les gens, avec un taux de bonne réponse de 62 %, connaissent le type d'habitat dans lequel les moustiques se reproduisent, mais seulement 30 % de ces mêmes personnes ont pu identifier ces gites sur leur propriété et à peine 15 % ont nettoyé les gites problématiques dans leur cour. Par ailleurs, bien que plus de 95 % des gens ont mentionné avoir entendu parler du VNO par les médias, à peine 4 % des gens ont nettoyés leur cour à la suite des recommandations faites par un des principaux messages véhiculés durant l'été par la direction des Communications du MSSS. Plusieurs questions ont cependant vu leur pourcentage de bonnes réponses augmenter dans la deuxième moitié de la saison, signifiant ainsi une plus grande connaissance générale des gens au fur et à mesure que la saison progresse (Société de

protection des forêts contre les insectes et maladies, 2005c). Selon les sondages téléphoniques réalisés par le MSSS, 24 % de la population interrogée enlève l'eau qui s'accumule autour de la maison (Laliberté *et al.*, 2005).

3 AMÉNAGEMENTS DES HABITATS FAVORABLES

En connaissant bien les espèces de moustiques vecteurs de certaines maladies et leur écologie, il est possible de mieux orienter les actions dans un contexte de lutte intégrée. Tel que décrit dans le rapport sectoriel 1 portant sur la problématique du VNO (Aubé-Maurice *et al.,* 2005), les habitats typiques et propices au développement des larves de moustiques consistent de manière générale en des plans d'eau stagnante et peu profonde (moins de un mètre). Ces plans d'eau peuvent être permanents ou temporaires et se trouver dans un milieu naturel ou artificiel. Comme la vie des moustiques est surtout liée à leur environnement, des changements ou des aménagements peuvent être apportés au milieu de manière à limiter la reproduction et l'émergence de moustiques adultes.

Ce chapitre, sans être une liste exhaustive, décrit certaines mesures utilisées principalement dans d'autres pays pour contrôler des moustiques vecteurs de maladies par des modifications physiques de l'environnement. En raison de la législation très stricte entourant la protection des milieux humides, les aménagements de zones favorables au développement des moustiques sont d'ailleurs délaissés depuis une quinzaine d'années en Amérique du Nord. Ces lois, combinées avec la mise en marché de larvicides biologiques vers la fin des années 80, ont fait en sorte que des aménagements physiques pour lutter contre les moustiques sont rarement entrepris. Quelques états américains en font néanmoins un peu, mais il est plutôt question aujourd'hui d'entretien d'aménagements réalisés dans les années 75 à 90 (Boisvert, 2006). Peu de références ont donc été recensées dans la littérature scientifique récente. De plus, étant donné que plusieurs de ces méthodes de contrôle sont utilisées pour lutter contre la malaria, la dengue et la fièvre jaune, et ce, dans des régions tropicales, elles doivent être mises en perspective avec la problématique québécoise qui est différente du point de vue des espèces de moustiques visées et de leurs habitats, de l'écologie des écosystèmes aquatiques, des conditions climatiques, de la législation en vigueur, etc.

3.1 MODIFICATIONS DES GITES NATURELS

Tel que décrit par Bourassa et Boisvert (2004), parmi les plans d'eau naturels pouvant soutenir la croissance puis la propagation de moustiques figurent, entre autres :

- dépressions du sol en forêt ou à sa lisière, formant des mares avec des feuilles;
- fossés et dépressions sur tourbe dans les champs ou en milieux ouverts;
- dépressions en zones de débordement de rivières et de ruisseaux;
- crevasses et trous dans les rochers, le long des cours d'eau et des rivages marins;
- étangs avec végétation, marécages et tourbières.

Un peu partout à travers le monde, différents aménagements des habitats naturels ou de l'environnement ont été proposés pour limiter l'incidence de maladies transmises par les moustiques. Les méthodes visant à modifier physiquement les gites de reproduction des

moustiques pour contrôler leur émergence présentées dans cette section ont été utilisées au début du siècle puis, ont été peu à peu délaissées avec l'apparition des pesticides.

3.1.1 Bordure de cours d'eau

Les cours d'eau possédant un débit lent et une profondeur irrégulière peuvent comportés le long de leur parcours des portions d'eau stagnante propices à la croissance de végétaux aquatiques pouvant favoriser la reproduction de certaines espèces de moustiques vecteurs de maladies. Par exemple, en Inde et dans des régions tropicales, des aménagements sont réalisés de manière à rendre les berges de ces cours d'eau plus abruptes. La diminution des surfaces exposées à l'accumulation d'eau peut ainsi limiter la présence d'eau stagnante et la croissance de végétaux émergents (Yadava *et al*., 1991; World Health Organization, 1982). Cependant, en accentuant l'inclinaison des berges, ceci amplifie les problèmes d'érosion. Ce type d'aménagement doit alors faire l'objet d'un entretien fréquent par des interventions manuelles ou mécaniques qui pourront avoir des effets néfastes sur l'écologie du cours d'eau (World Health Organization, 1982).

De manière à éviter l'inondation de la plaine environnante lors des périodes de crues, un canal auxiliaire moins profond et plus direct peut être creusé pour transporter le surplus d'eau du cours d'eau à certaines périodes de l'année. Une partie du débit de la rivière court-circuite alors la portion de la rivière la plus à risque aux inondations. Ce canal auxiliaire doit cependant être bien nivelé pour y éviter l'accumulation d'eau stagnante au cours des saisons plus sèches (World Health Organization, 1982).

Une autre méthode utilisée depuis plusieurs décennies dans de nombreux pays pour le contrôle de la malaria consiste à tirer profit de la présence d'un barrage (Konradsen *et al*., 1998). En libérant périodiquement une importante quantité d'eau en amont, la vague résultante, se traduisant par une augmentation soudaine du niveau et du débit de l'eau, exposerait bon nombre de larves et d'œufs de moustiques au courant et aux prédateurs. De plus, les sédiments déplacés par un brassage fréquent du cours d'eau enseveliraient un certain nombre de larves. Une inhibition de l'invasion des plantes résulterait aussi de l'augmentation fréquente du niveau de l'eau (World Health Organization, 1982).

Au Québec, bien que les larves de *Cx pipiens* et de *Cx restuans* puissent se développer en bordure de rivière, en des endroits inondés, dans des mares riveraines, des aulnaies et des saulaies (Bourassa, 2000; Maire et Aubin, 1980), il est plutôt rare, contrairement aux régions tropicales, que des espèces de moustiques vecteurs du VNO se reproduisent dans les portions lentes des cours d'eau (Bourassa, 2006). Par ailleurs, la législation en vigueur au Québec ne permettrait pas de modifier physiquement des habitats naturels du fait que de tels aménagements généreraient des impacts négatifs importants sur la qualité de l'environnement. Ce type d'aménagement ne serait donc pas pertinent et acceptable dans le contexte québécois.

3.1.2 Marais d'eau douce

Traditionnellement, dans les régions plus chaudes, un grand fossé central assez profond était creusé avec des fossés latéraux plus petits pour soutenir toute l'année une population de poissons prédateurs et assurer leur accès aux lieux de reproduction des moustiques. La construction d'un réseau de fossés de drainage, limitant l'accumulation d'un surplus d'eau stagnante à l'occasion de précipitations intenses, pouvait aussi être une autre mesure envisageable (Florida coordinating council on mosquito control, 1998). Les marais d'eau douce étant des habitats à la fois riches et fragiles, de telles modifications ont d'importantes conséquences sur l'écologie du milieu en raison des changements hydrologiques qu'elles impliquent faisant en sorte que de tels aménagements sont maintenant délaissés.

Selon les travaux de Batzer et Resh (1992) réalisés en Californie et au Minnesota, dans le cas des marais où il y a d'importantes quantités de végétaux émergents, une réduction de 50 % de la surface du marais occupée par la végétation (par coupe ou par enlèvement des végétaux morts) permettrait de nuire à la reproduction des moustiques tout en favorisant la survie de certaines espèces animales. Comme cet aménagement permettrait la survie d'invertébrés, tels que chironomides et dytiques faisant partie du régime alimentaire des oiseaux aquatiques, ceci favoriserait par le fait même l'établissement de ces oiseaux aquatiques dans un tel milieu. Cette modification aurait également pour effet de concentrer les zones de reproduction de moustiques aux endroits recouverts par la végétation, limitant ainsi l'abondance de leurs larves (Batzer et Resh, 1992). L'augmentation du niveau de l'eau du marais est une autre méthode qui permettrait de réduire la reproduction des moustiques tout en rendant l'habitat plus attrayant pour les oiseaux aquatiques. Les invertébrés faisant partie du régime alimentaire des oiseaux sont en effet présents en densité plus importante dans un marais d'une profondeur de 60 cm, que dans un marais de 20 ou de 40 cm de profondeur, alors que la densité de larves de moustiques est réduite dans les marais plus profonds (Batzer et Resh, 1992).

Au Québec, ce type d'intervention ne pourrait être réalisé puisqu'il va à l'encontre de la législation protégeant la qualité de l'environnement et la conservation des ressources naturelles ainsi que de la *Politique fédérale sur la conservation des terres humides* qui assure la promotion de la conservation des terres humides (Gouvernement du Canada, 1991). Cette politique, en vigueur depuis 1991, vise à favoriser la conservation des terres humides, ces dernières jouant un rôle prépondérant dans le maintien de la qualité de l'environnement, des populations d'oiseaux migrateurs et des activités économiques et récréatives reliées à la pêche.

3.1.3 Marais d'eau salée

L'une des premières méthodes qui a été utilisée pour le contrôle des moustiques de marais salants consistait au remplissage du marais lui-même. D'autres méthodes furent par la suite considérées impliquant généralement le creusage de fossés pour drainer l'eau du marais (Wolfe, 1996) ou bien l'endiguement d'une portion du marais suivi d'un pompage visant à faire monter le niveau de l'eau et ainsi contrôler les populations de moustiques. Ces

aménagements ne sont, dans la plupart des cas, plus admissibles aujourd'hui en raison de leur impact sur l'écologie des marais (Florida coordinating council on mosquito control, 1998).

La technique d'aménagement des eaux de marais ouverts (*Open Marsh Water Management*), développée à la fin des années 60, vise la création d'un lien aquatique permanent entre la portion du marais où se reproduisent les moustiques et un plan d'eau subissant régulièrement l'influence de la marée. Ce lien prend la forme d'un fossé qui assure une circulation constante de l'eau au gré des marées, tout en permettant à des poissons prédateurs d'accéder aux régions plus reculées du marais où se trouvent les larves de moustiques (Florida coordinating council on mosquito control, 1998; Wolfe, 1996). L'introduction de poissons prédateurs tels que *Gambusia* est toutefois controversée étant donné les répercussions sur la biodiversité de l'écosystème et sur l'abondance d'espèces locales (Knight *et al*., 2003). L'utilisation de fossés peu profonds (moins de trois pieds) est considérée comme étant plus acceptable du point de vue environnemental en raison du peu de répercussions qu'ils occasionnent sur l'hydrologie du marais (Westchester county board of health, 2001). Beaucoup de ces installations sont en place sur la côte Est des États-Unis, du Massachusetts à la Floride. Une étude au Massachusetts a même révélé une réduction de plus de 99 % de la production de moustiques dans un marais salant à la suite de cet aménagement (Hruby *et al*., 1985). Ce type d'installation peut, en principe, durer aussi longtemps que le parcours des fossés est maintenu en bon état, ce qui rend la méthode économique à long terme malgré le coût d'installation important. Il est estimé que sur la durée de vie d'un aménagement des eaux de marais ouverts, il coûterait quatre à cinq fois moins cher qu'un système basé sur l'utilisation d'insecticides (Wolfe, 1996). D'autres aménagements basés sur le même principe consistent à construire, lorsqu'un lien entre les zones de reproduction des moustiques et une étendue d'eau influencée par la marée n'est pas envisageable, un bassin profond entouré de fossés radiaux. L'aménagement rotatoire des endiguements (R*otational Impoundment Management*) repose quant à lui sur la construction d'un barrage pour délimiter la portion du marais ayant une forte production de moustiques (Florida coordinating council on mosquito control, 1998).

Au Québec, comme les principales espèces de moustiques vecteurs du VNO se développent en eau douce et qu'il n'y ait aucune évidence que l'introduction de nouvelles espèces de moustique pourrait envahir les marais d'eau salée, ce genre d'intervention n'est pas pertinent. Tout comme pour les aménagements en bordure de cours d'eau et des marais d'eau douce, ce type d'intervention irait à l'encontre de la législation mise en place au québec pour préserver la qualité des écosystèmes aquatiques.

3.2 MODIFICATIONS DES GITES ARTIFICIELS

Des gites artificiels, créés par les activités ou les constructions humaines, peuvent également être sollicités par certaines espèces de moustiques, notamment celles cherchant à s'installer en territoires nouveaux. Parmi les principaux gites artificiels qui pourraient être colonisés par des moustiques, il est question :

- des récipients de métal ou de plastique, des carcasses d'appareils ménagers et de voitures, les pneus abandonnés, des bidons et réservoirs d'eau;
- des bassins et des mares formés par l'endiguement de cours d'eau, des puisards et des bassins de rétention des eaux provenant des égouts pluviaux, des fossés creusés sur les terres agricoles ou le long des routes et des voies ferrées lorsqu'ils sont obstrués;
- des jardins d'eau stagnante;
- des marais salants et des mares issues de dépotoirs à neige usée (Bourassa et Boisvert, 2004).

Ces gites artificiels, lorsque situés à proximité des installations humaines, peuvent alors représenter un risque non négligeable pour la transmission de maladies par des moustiques. Pour contrer l'émergence de moustiques vecteurs de maladies de ces gites artificiels, différents aménagements peuvent être apportés. Cette section décrit des méthodes qui ont été mises en place dans différents pays pour lutter contre des problématiques spécifiques de transmission de maladie par des moustiques.

3.2.1 Bassins de traitement des eaux usées

Dans certaines régions tropicales et subtropicales, la température et l'adaptation de certaines espèces de moustiques font en sorte que des installations inadéquates de traitement des eaux usées peuvent parfois devenir des gites favorisant la reproduction des moustiques. Les bassins de traitement de type mixte (également appelés facultatifs) combinent la décomposition aérobie en surface et la décomposition anaérobie en profondeur. Ils sont reconnus comme pouvant avoir un potentiel de production de moustiques élevé en particulier si les berges du bassin sont peu abruptes (World Health Organization, 1982). La stagnation de l'eau favorise une sédimentation, alors que la présence de végétaux permet un abaissement marqué de plusieurs polluants (Knight *et al.*, 2003). De plus, la stagnation d'une eau n'ayant pas subi de traitement préalable risque de favoriser la reproduction des moustiques du genre *Culex* (Carlson et Knight, 1987).

De façon générale, plus un plan d'eau est étendu, plus la productivité en moustiques est faible par rapport à sa surface. Il est donc préférable de centraliser les lieux de traitement des eaux usées lorsque c'est possible, plutôt que d'en construire un grand nombre de superficie moindre (Florida coordinating council on mosquito control, 1998). Des dispositifs mécaniques permettant une circulation à la surface du plan d'eau, ce qui est nuisible à la survie des larves de moustiques, peuvent être implantés ou encore, des dispositifs permettant un contrôle aigu du niveau et du débit de l'eau de façon à pouvoir s'ajuster aux besoins les plus importants variant en fonction du temps et des conditions

environnementales (que ce soit la réduction de la reproduction des moustiques, l'amélioration du traitement de l'eau ou la disponibilité de l'eau pour d'autres activités).

La présence de berges à pente prononcée est aussi une caractéristique structurale reconnue comme étant nuisible aux larves de moustiques et devrait donc être prise en compte dans la construction des bassins de traitement (Knight *et al.*, 2003; Florida coordinating council on mosquito control, 1998).

Les bassins de traitement des eaux usées peuvent être aménagés pour limiter la reproduction des moustiques en contrôlant plusieurs facteurs hydrologiques et biologiques. Les manipulations doivent cependant tenir compte de l'efficacité du traitement de l'eau désiré et de l'importance que l'on accorde à la valorisation de l'habitat pour les autres espèces (en particulier dans le cas des marais artificiels). Certaines recommandations par rapport au lieu de construction des bassins de traitement peuvent être aussi pertinentes. Il est préférable d'éviter autant que possible une trop grande proximité entre les bassins de traitement des eaux usées et les installations humaines. Cependant, comme les sources d'eaux usées proviennent des activités humaines, elles se trouvent donc près des milieux habités.

Au Québec, les bassins de traitement des eaux usées d'origine domestique les plus communs sont de type mixte et sont parfois caractérisés par une oxygénation artificielle visant à favoriser la décomposition aérobie. L'eau qui y est acheminée n'a généralement pas subi de traitement préalable (Gouvernement du Québec, 2001). Néanmoins, aux dires de certains chercheurs québécois et selon leur expérience sur le terrain, les risques de voir ces milieux proliférer en moustiques sont à toutes fins pratiques nuls puisque les larves de moustiques y sont absentes (Boisvert, 2006; Bourassa, 2006). Les dispositions des villes dans la gestion de ces milieux écartent une telle éventualité. Par ailleurs, les étangs de rétention de certaines compagnies sont tellement riches en matière en suspension que très peu de femelles moustiques sont tentées d'y pondre (Boisvert, 2006). Aucun aménagement particulier ou intervention au regard des systèmes de traitement des eaux usées n'est pertinent dans le contexte québécois.

3.2.1.1 Marais artificiels

Une méthode assez récente visant le traitement des eaux d'origine domestique consiste à aménager un marais reproduisant les conditions prévalant dans un marais naturel. Ce type d'installations, adaptés aux petites municipalités et aux industries isolées, s'est beaucoup répandu en Amérique du Nord et en Europe depuis le début des années 80 en raison du faible coût de traitement de l'eau qui y est associé et de son rôle écologique (Jiannino et Walton, 2004; Knight *et al.*, 2003). En plus d'améliorer la qualité des eaux usées, ces bassins améliorent souvent la qualité de l'habitat de plusieurs espèces vivantes et peuvent même servir de lieux de plaisance aux populations humaines (Jiannino et Walton, 2004). Ce type d'aménagement doit cependant faire face à une double problématique en ce qui a trait à la présence des plantes. En effet, il est essentiel que le bassin abrite une quantité suffisante de végétation pour assurer un traitement optimal d'assainissement de l'eau (Knight *et al.*,

2003). Par contre, la présence de plantes aquatiques favorise la production de moustiques, puisqu'elle fournit aux larves un refuge contre les prédateurs et contre les perturbations physiques comme le courant et les vagues. Elle augmente également la quantité de nourriture disponible pour les larves (algues, protozoaires, bactéries, détritus organiques, etc.) en fournissant un substrat pour l'attachement et une source de carbone (Jiannino et Walton, 2004). Les méthodes pour contrer l'émergence des moustiques par l'entremise du contrôle de la végétation ne doivent donc pas nuire à l'efficacité du traitement des eaux usées.

L'aménagement du milieu de façon à favoriser l'établissement d'une population permanente de poissons se nourrissant de larves de moustiques pourrait limiter la production en moustiques d'un marais artificiel, mais, tel qu'indiqué à la section 3.1.3, l'utilisation de poissons prédateurs est controversée (Knight *et al.*, 2003). Le choix des espèces de plantes utilisées pour le traitement de l'eau pourrait se faire en considérant les avantages qu'elles confèrent aux larves de moustiques. Les espèces de plantes les plus utilisées, telles que les quenouilles (genre *Typha*), les phragmites (*Phragmites communis*) ainsi que beaucoup d'espèces de scirpes (genre *Schoenoplectus*), devraient apparemment être évitées (Knight *et al.*, 2003). Plus de recherches demeurent néanmoins nécessaires pour bien comprendre l'effet des différentes espèces de plantes sur la reproduction des moustiques. Une attention particulière devrait aussi être portée au regard des eaux acheminées, qui devraient avoir subit un traitement préalable, pour que le marais puisse conserver ses caractéristiques. Un apport d'eau insuffisamment traitée risquerait de favoriser une croissance désordonnée de la végétation aquatique ou encore de la faire mourir favorisant ainsi la survie des larves si cette végétation n'est pas retirée (Florida coordinating council on mosquito control, 1998).

Les marais artificiels pour le traitement des eaux usées domestiques ont été introduits au Québec à partir du début des années 1990 à la suite d'études de techniques de remplacement applicables à l'assainissement des eaux usées des petites agglomérations, coordonnées par la Société québécoise d'assainissement des eaux en collaboration avec le MDDEP. Quelques installations ont été réalisées au cours des années 1990 (Gouvernement du Québec, 2001). Étant donné les conditions climatiques québécoises, le type de traitement qui pourrait être adapté à nos conditions serait celui à écoulement dans le sol (sous la surface) qui ne présente pas de problématique de prolifération et d'émergence de moustiques (Gouvernement du Québec, 2001). Ce genre d'aménagement n'est donc pas justifié en vue de limiter le risque de transmission du VNO au Québec.

3.2.1.2 Bassins de traitement inondés de façon intermittente

Si la plupart des plans d'eau de traitement sont inondés de façon permanente, certains le sont de façon intermittente en raison de la petite quantité d'eau qu'ils traitent ou de l'irrégularité des besoins de traitement pour lesquels ils ont été conçus. C'est le cas de beaucoup de systèmes privés de traitement des eaux usées, notamment ceux associés aux industries agricoles transformant certaines céréales aux États-Unis (Florida coordinating council on mosquito control, 1998). Lorsqu'ils ne sont pas utilisés, ces bassins doivent être asséchés rapidement (idéalement en moins de trois jours) et complètement pour éliminer

toutes les larves de moustiques présentes dans l'eau et pour éviter que des moustiques viennent y déposer leurs œufs, comme les espèces du genre *Aedes*. Pour ce faire, le plan d'eau devrait être construit sur un sol très absorbant et le fond du bassin devrait être régulièrement nivelé pour éviter la création de mares d'eau stagnante lors des vidages (Florida coordinating council on mosquito control, 1998). Un système de drainage périphérique adéquat, empêchant une accumulation d'eau aux endroits où se déverse le bassin, constitue également un atout important pour le contrôle des moustiques. S'il est possible de vider le bassin aussi souvent que désiré, il peut être très intéressant de tenir compte de la durée du cycle de vie aquatique des espèces de moustiques nuisibles en présence pour établir la durée maximale d'inondation du bassin (Mayhew *et al*., 2004).

Le drainage régulier des bassins de traitement des eaux usées issues de production animale peut également constituer une méthode de contrôle pour certaines espèces de moustiques vecteurs de maladies (Mayhew *et al.*, 2004). C'est particulièrement le cas dans les bassins non aérés où les conditions de pollution extrême nuisent à la survie de la majorité des espèces vivantes (dont les prédateurs naturels des larves de moustiques), mais qui peuvent malgré tout être des milieux propices pour la reproduction de certaines espèces de moustiques vecteurs de maladies. De tels bassins se trouvent sur les fermes où l'eau usée est régulièrement mise dans des lagunes sans traitement préalable (Florida coordinating council on mosquito control, 1998). Lors du vidage de ces bassins, les mêmes dispositions que celles pour les bassins dont les besoins d'utilisation intermittents imposent un vidage fréquent s'appliquent.

3.2.2 Réservoirs et barrages

Les grandes étendues d'eau générées par la construction de barrages peuvent également représenter des habitats favorables à la reproduction de moustiques vecteurs de maladies, surtout dans les régions tropicales et subtropicales. Dans ce type de plans d'eau, certaines espèces de moustiques se reproduisent principalement le long des berges calmes et peu profondes, où prolifère la végétation aquatique, et dans les mares créées par les variations du niveau de l'eau du réservoir. Étant donné que la majeure partie de la surface inondée est relativement profonde, elle ne représente pas un milieu favorable au développement des moustiques. Dans le cas des barrages construits dans des environnements où les conditions naturelles favorisent déjà la reproduction des moustiques, la création d'un réservoir peut même faciliter le contrôle des moustiques en éliminant de nombreux microsites propices à leur reproduction, par leur inondation, ce qui permet une centralisation des mesures de contrôle autour d'un unique plan d'eau (World Health Organization, 1982).

La variation régulière du niveau de l'eau permettrait de contrer l'émergence des moustiques se reproduisant au travers des plantes aquatiques le long des berges (Yadava *et al.*, 1991). Toutefois, un bon système de drainage des berges entre les niveaux maximum et minimum de l'eau est nécessaire pour éviter la formation de mares propices à la reproduction des moustiques, lors d'un abaissement du niveau de l'eau, et pour assurer l'assèchement le plus complet possible de ces zones. Pour les réservoirs dont le niveau est facilement contrôlable (par exemple les réservoirs combinant plusieurs fonctions), une technique de manipulation

du niveau de l'eau comportant quatre phases peut être appliquée (World Health Organization, 1982). Le niveau de l'eau est d'abord élevé d'une trentaine de centimètres au-dessus du niveau maximal d'utilisation pour lequel le réservoir est prévu puis, retourné rapidement à son niveau d'origine. Ceci permettrait d'accumuler sur les berges du réservoir une bonne partie des débris et de la végétation flottante, qui peuvent alors être retirés. Le niveau du réservoir est maintenu constant jusqu'à ce que la production de moustiques débute après quoi, le niveau de l'eau est modulé (avec une amplitude d'environ 30 cm) de façon hebdomadaire. Ces variations limiteraient la reproduction des moustiques puisque les sites propices à la ponte des œufs seraient alors temporairement éliminés lorsque la végétation marginale est découverte. Une partie des œufs et des larves seraient aussi exposés à la dessiccation, alors que le reste des larves ne bénéficieraient plus de la protection contre les prédateurs fournis par les plantes aquatiques. La dernière phase consiste à combiner une baisse saisonnière du niveau de l'eau avec la fluctuation cyclique (en faisant par exemple baisser le niveau de l'eau de 30 cm pour ensuite le faire remonter de 27 cm à chaque cycle). Ceci a également pour effet d'assurer une marge d'eau libre de végétation à chaque cycle d'abaissement de l'eau (World Health Organization, 1982).

Ces aménagements sont applicables en régions tropicales et subtropicales, là où il y a effet de tempêtes, telle la mousson. Les problématiques liées aux moustiques dans ces régions sont fort importantes et différentes de celles du Québec. À prime abord, la productivité des réservoirs en moustiques vecteurs de maladies et leur proximité des installations humaines devraient être prises en compte de manière à évaluer le risque pour la population que ces gites représentent avant d'entreprendre toute action visant un contrôle des moustiques. Compte tenu de la très faible densité des populations humaines au nord de la vallée du Saint-Laurent et de la distribution géographique du VNO, il est peu probable que des interventions dans les grands réservoirs du nord québécois soient ainsi pertinentes, voire même praticables dans le contexte québécois.

3.2.3 Fossés le long des axes de transport

Les fossés longeant les axes de transport, tels que le long des autoroutes ainsi qu'en bordure des routes secondaires et des chemins de fer, et les fossés agricoles peuvent devenir des gites artificiels pour la reproduction de certaines espèces de moustiques. Ces fossés, lorsqu'ils ne sont pas entretenus, peuvent favoriser une accumulation et une stagnation de l'eau.

Lors du suivi des populations de moustiques adultes, réalisé par la SOPFIM, les moyennes de captures les plus élevées ont été enregistrées principalement dans des secteurs de municipalités plutôt localisées dans un environnement rural où la présence de gites naturels (champs, fossés, etc.) est probablement supérieure à ce que l'on pourrait trouver en ville (Société de protection des forêts contre les insectes et maladies, 2005e). Ces résultats semblent indiquer, malgré la présence de *Culex* en milieu urbain, que les conditions régnant en milieux plus ruraux favoriseraient une plus grande productivité des gites et par conséquent des adultes qui en émergent. Une attention particulière devrait donc être portée à ces milieux susceptibles d'être problématiques.

Un simple nettoyage annuel permettrait une amélioration du drainage, alors qu'une coupe régulière de la végétation typique de ce milieu rendrait les conditions de reproduction des moustiques moins favorables (Ellis, 2004). La forme et la composition des fossés eux-mêmes peuvent également influencer leur potentiel de production de moustiques. Comme pour d'autres plans d'eau, des pentes abruptes et une profondeur d'eau importante peuvent limiter la reproduction des moustiques (Ellis, 2004). Un fond composé de roches, de gravier ou de sable permet également un écoulement plus rapide de l'eau (World Health Organization, 1982).

Au Québec, les fossés le long des circuits routiers ne sont cependant pas les plus productifs en larves de moustiques et demeurent négligeables (Bourassa, 2006). En effet, une étude a recensé 210 familles d'insectes le long d'emprises autoroutières du sud du Québec dans la végétation plus haute et les fossés alimentés en eau (Ministère des Transports du Québec, 2006). Sur ces 210 familles d'insectes recensées, 10 étaient nettement dominantes; les fourmis représentaient la moitié de tous les insectes recensés, suivies des collemboles. Selon les résultats obtenus, la présence d'arbustes ombrageant les fossés limiterait le développement d'herbacées de grande taille et réduirait le comblement des fossés et la stagnation de l'eau qui favorisent le développement des éphémères et des insectes piqueurs dont les moustiques.

La nouvelle méthode instaurée au cours des dernières années par le ministère des Transports du Québec (MTQ) pour l'entretien du réseau autoroutier permet d'ailleurs de conserver les fossés sous couvert arbustif, ce qui empêche des plantes comme la quenouille et le phragmite de nuire au drainage des fossés (Ministère des Transports du Québec, 2003). Cette nouvelle approche consiste à tondre uniquement les deux premiers mètres à partir de la chaussée et à laisser ailleurs la flore locale. Les fossés font l'objet d'une coupe sélective ou un rabattage aux 10 ans ainsi qu'un nettoyage par l'application de la méthode du tiers inférieur. La végétation du fond du fossé est ainsi éliminée tout en laissant en place les plantes qui recouvrent les parois. En plus d'accroître la sécurité des usagers, d'embellir le paysage ainsi que de tenir compte de la flore et de la faune existantes tout en assurant le contrôle de l'herbe à poux, cette approche vise à éviter le colmatage des fossés limitant ainsi leur potentiel de devenir des gites de reproduction pour les moustiques, dont certains peuvent être vecteurs de maladie, dont le VNO.

3.2.4 Puisards et canalisations souterraines

Les moustiques du genre *Culex* sont reconnus pour se reproduire dans les puisards et les égouts pluviaux en milieu urbain. Ces puisards se trouvent autant dans des quartiers résidentiels que dans les parcs et les secteurs industriels. En offrant une humidité et une température appropriées et en retenant une certaine quantité d'eau et des matériaux organiques, les puisards deviennent des lieux de prédilection pour le développement des moustiques (Bourassa et Boisvert, 2004). Les résultats des suivis larvaires menés par la SOPFIM ont révélés qu'environ 29 % des puisards en eau contenaient des larves (moyenne saisonnière) en 2003 (Société de protection des forêts contre les insectes et maladies, 2003), 23 % en 2004 (Société de protection des forêts contre les insectes et maladies, 2004)

et 19 % en 2005 (Société de protection des forêts contre les insectes et maladies, 2005f). Les résultats de ces suivis indiquent que ce ne sont donc pas tous les puisards qui contiennent des larves et que peu d'entre eux possèdent de très fortes densités larvaires.

Des pourcentages de colonisation similaire (23 %) ont aussi été obtenus dans le cadre d'un projet de recherche portant sur le relevé des gites à *Culex* dans des espaces verts et récréatifs ainsi que dans des milieux industriels et non spécifiques. Plus de 55 % des gites visités dans ces milieux étaient des puisards colonisés par *Cx pipiens* et *Cx restuans* (Société de protection des forêts contre les insectes et maladies, 2005c). Ces résultats semblent indiquer que le type de gites présents a une influence plus grande sur la colonisation des *Culex* que le type de secteur proprement dit.

Comme ces gites artificiels sont situés à proximité des habitations humaines, il y aurait lieu d'évaluer les aménagements possibles comme alternative à leur traitement avec des larvicides. Plusieurs éléments peuvent influencer la reproduction des moustiques dans les puisards, tels que les facteurs environnementaux (conditions climatiques, végétation environnante, autres gites à proximité, quantité et qualité des eaux de ruissellement), paramètres de construction (design de l'infrastructure) et d'opération (fréquence de l'entretien) ainsi que leur localisation (Metzger, 2004; Metzger *et al*., 2002).

Le *California Department of Health Services's Vector-Borne Disease Section* a mené une étude sur la production de vecteurs associés à différentes structures et technologies de captage des eaux de ruissellement dans le sud de la Californie (Kluh *et al*., 2002; Metzger *et al.*, 2002). Ce projet pilote a été réalisé de mai 1999 à avril 2001 en collaboration avec les agences de santé publique locales et des consultants en gestion des eaux pluviales. Une enquête à l'échelle nationale a aussi été conduite auprès de 150 agences de 28 États comportant différentes conditions (climat, écosystème, densité de population, etc.). Les résultats ont révélés que plusieurs des infrastructures en place, surtout celles retenant de façon permanente de l'eau stagnante, représentaient un gite potentiel pour la reproduction des moustiques, dont ceux du genre *Culex*, et supportaient des populations importantes de moustiques comparativement aux structures se drainant rapidement et régulièrement. D'autres structures étaient colmatées en raison d'un mauvais fonctionnement du système de vidage. Malgré tout, peu d'agences avaient une expérience sur les aménagements possibles pour réduire cette production.

Afin de limiter l'émergence des moustiques adultes des puisards, il est nécessaire que l'eau stagnante dans cette infrastructure ne soit disponible sur un certain temps. Pour ce faire, trois moyens sont possibles : éliminer rapidement l'eau accumulée, empêcher les moustiques adultes d'y pondre ou rendre ce gite moins favorable pour leur reproduction (Metzger, 2004).

Des recommandations sur le design comme tel de la structure et sur son entretien régulier ont été proposées de manière à prévenir la stagnation de l'eau (Kluh *et al.*, 2002; Metzger *et al.*, 2002). Les résultats de ces modifications indiquaient clairement par la suite une réduction de la production de moustiques (Kluh *et al.*, 2002). La considération la plus

importante à retenir pour la conception des puisards et égouts pluviaux vise l'accumulation et la rétention de l'eau qui ne doit pas excéder une période de 72 heures. Le développement des moustiques, de l'œuf à l'adulte, est influencé par la température et la disponibilité de la nourriture. Lorsque les conditions sont favorables, certaines espèces de moustiques se développent en moins d'une semaine. En Californie, en raison de la conception particulière de certains puisards, l'eau peut y stagner sur plus de 72 heures. Il est alors recommandé d'y assurer une surveillance et de modifier leur conception de manière à assurer un drainage complet et régulier du puisard et d'en assurer l'entretien approprié pour que l'eau ne soit présente pas plus de 72 heures (Metzger, 2004; Kluh *et al.*, 2002; Metzger *et al.*, 2002).

La présence potentielle de moustiques (larves et adultes) dans les canalisations souterraines a aussi été démontrée dans certaines municipalités américaines, dont Los Angeles (Miladin, 2004). Afin de déterminer si les canalisations souterraines pouvaient être un milieu de reproduction propice au développement des populations de moustiques, un système de caméra avec une bonne visibilité, mobile et dirigeable a été utilisé dans les conduits souterrains par la SOPFIM à l'été 2005 (Société de protection des forêts contre les insectes et maladies, 2005f). Aucune eau stagnante n'était cependant présente parmi la dizaine de canalisations visitées, ne révélant ainsi aucun gite potentiel pour la reproduction de moustiques. Les résultats ont permis de constater que chacune des canalisations comportait une faible pente permettant aux eaux de pluie de bien s'écouler vers un collecteur principal. Des larves ont été observées dans tous les puisards connexes aux canaux, mais aucun moustique n'a été observé à la caméra à l'intérieur des conduits. Malgré le peu d'observations effectuées, il est permis de croire que, contrairement aux systèmes de canalisations de la ville de Los Angeles où l'eau stagnante offre des gites impressionnants pour la reproduction des *Culex sp* (Miladin, 2004), les systèmes de canalisations québécois n'offrent pas ce genre de gites. Il serait néanmoins intéressant de poursuivre cette expérimentation de façon plus approfondie, sur une plus grande échelle et durant la période où les puisards possèdent les plus hauts taux de colonisation, afin de s'assurer que certains secteurs des canalisations n'offrent pas de gites potentiels à la reproduction des *Culex*.

Au Québec et comme partout ailleurs, étant donné que les coûts initiaux pour la construction d'un puisard sont minimes comparés aux frais encourus pour son entretien régulier, qui peut s'étaler sur plusieurs années ou décennies, ceci explique pourquoi les infrastructures actuelles ont été construites de manière à limiter leur entretien. Afin de limiter le risque de transmission d'une maladie vectorielle, dont les vecteurs utilisent les puisards offrant des conditions favorables pour se reproduire, il pourrait être avantageux à long terme de prévoir leur conception et leur entretien en tenant compte de cette problématique. Les infrastructures actuelles pourraient également être améliorées.

Les recherches effectuées dans le cadre de la présente étude n'ont pas permis d'identifier des aménagements ou des technologies spécifiques limitant la reproduction des moustiques dans les systèmes d'égouts pluviaux et de canalisations. En effet, peu d'études portant sur les vecteurs issus d'habitats artificiels créés par les infrastructures de captage des eaux de ruissellement ont été réalisées jusqu'à ce jour. Il semblerait donc judicieux d'effectuer des recherches en ingénierie pour concevoir des systèmes d'égouts et de canalisations limitant

la reproduction des moustiques. Pour ce faire, il importe que les agences de santé publiques locales et les gestionnaires des réseaux d'égout pluviaux des municipalités (ingénieurs civils, urbanistes, etc.) soient impliqués de manière à s'assurer que les infrastructures de drainage soient efficaces, sécuritaires et ne présentent pas de sources pouvant générés des problèmes de santé publique. Ces nouveaux systèmes pourraient graduellement prendre la place des anciens lors de la réparation ou du remplacement de certaines sections du réseau d'égouts pluviaux.

3.2.5 Terrains vagues et terrains commerciaux

Les terrains vagues peu ou pas entretenus, retrouvés par exemple sur les sites industriels ou encore en bordure des villes, peuvent héberger des gites potentiels pour plusieurs espèces de moustiques, dont certaines peuvent être vecteurs de maladies. En effet, les trous et les dépressions rencontrés sur ces types de terrain se remplissent d'eau lorsqu'il pleut et ils ne ne sont généralement pas drainés, offrant ainsi des conditions favorables pour la reproduction de certaines espèces de moustiques. Ces terrains devraient donc faire l'objet d'un entretien minimum et régulier de manière à éviter l'accumulation sur plusieurs jours de cette eau stagnante. Par exemple, le terrain pourrait être nivelé de manière à remplir les dépressions accumulant de l'eau (World Health Organization, 1982).

Par ailleurs, les terrains vagues ou abandonnés sont souvent utilisés par la population comme lieu de disposition pour des déchets domestiques ou industriels, bien que ce soit à l'encontre de la législation en vigueur. Beaucoup de ces déchets permettent, à la suite de précipitations, une accumulation d'eau parfois suffisamment longtemps pour que des larves de moustiques puissent y compléter leur développement. Le recouvrement de ces déchets par une toile imperméable ou leur perforation constitueraient un moyen de diminuer les risques de formation d'habitats favorables à la reproduction des moustiques (Florida coordinating council on mosquito control, 1998).

Une attention devrait aussi être accordée aux cours arrière de certains établissements commerciaux entreposant de la marchandise considérée comme favorable pour le développement de moustiques. Par exemple, les cours de détaillants de pneus, de pépinières, de garages, ainsi que les sites de construction et plusieurs autres entreprises devraient appliquer des mesures particulières sur les matériaux entreposés pour éviter qu'ils accumulent de l'eau stagnante et disposer de leurs déchets problématiques de manière adéquate (Passos *et al*., 1998).

Un relevé des gites de développement larvaire a été effectué au cours de l'été 2004 par la SOPFIM dans des espaces verts et récréatifs (parcs, boisés, cours d'école), des milieux industriels (cours de petites et moyennes entreprises, grosses multinationales) et des sites non spécifiques (dépotoirs, dépôts à neige, cimetières, carrières, cours de recyclage des métaux, etc.) de la région métropolitaine de Montréal. Plusieurs visites ont été effectuées afin de suivre l'évolution de ces gites autant en ce qui a trait à leur persistance dans le temps (gite temporaire ou permanent), qu'au niveau des successions d'espèces (Société de protection des forêts contre les insectes et maladies, 2005c). Trois industries et 11 sites non

spécifiques ont donc été suivis. Chacun de ces sites pouvait contenir plusieurs gites. Les gites les plus fréquemment répertoriés étaient les puisards (55 %), les ornières (16 %) et les fossés (16 %). Les trous d'excavation, les bacs d'eau, les pneus et les étangs étaient de nombres égaux avec 2 %. Parmi les différentes espèces trouvées sous forme de larves dans ces divers gites, la plus fréquente était du genre *Culex* (78 %), dominée par *Cx pipiens*.

Un suivi des populations de moustiques adultes de 12 secteurs de la région métropolitaine de Montréal a aussi été effectué par la SOPFIM à l'été 2004 (Société de protection des forêts contre les insectes et maladies, 2005e). Ce projet de recherche avait notamment pour objectif de comparer les populations de *Culex* dans les milieux résidentiels et des milieux non résidentiels caractérisés comme étant un endroit « problématique » (par exemple, des sites de dépôt à neige, des cours de garage, des terrains abandonnés, etc.). Ces sites « problématiques » avaient donc été choisis dans le but d'essayer de démontrer que certains types d'environnement étaient plus propices au développement des populations de *Culex*. Bien que ce projet ne se soit déroulé que sur une saison, les résultats de capture obtenus permettent toute de même de tirer certaines tendances. Il semble notamment que le nombre de moustiques du genre *Culex* trouvés dans les sites non résidentiels ne soient pas supérieurs à ceux trouvés dans les sites résidentiels, malgré un environnement qui semblait à première vue plus favorable au développement de ces espèces (présence d'eau permanente, sites non entretenus, etc.).

Néanmoins, pour contrer les problèmes de moustiques sur ces terrains industriels et commerciaux privés jugés problématiques, des interventions devraient avoir lieu sur les principaux gites retrouvés, soit les puisards, les ornières et les fossés. Des aménagements, tels que ceux décrits aux sections 3.2.3 et 3.2.4, pourraient être mis en place. Cependant, il est difficile de faire adopter des améliorations et des nouvelles approches étant donné les considérations financières qu'elles peuvent impliquer pour les compagnies propriétaires de ces terrains. Des efforts devraient donc être consentis dans un premier temps afin de sensibiliser les propriétaires de ces terrains de la problématique.

3.2.6 Sites de dépôt à neige

Des études récentes ont démontré que les dépôts à neige pouvaient être colonisés par des espèces de moustiques, dont celles du genre *Culex* (Société de protection des forêts contre les insectes et maladies, 2005c). En raison des conditions climatiques hivernales au Québec, ces sites sont très nombreux et contiennent généralement des quantités de neige considérables. Dès l'arrivée du printemps, ces sites se transforment en gite potentiel pour les larves de *Culex* avec la fonte des neiges. Compte tenu de la quantité de neige présente sur ces sites, le temps de fonte se prolonge jusqu'à tard dans l'été, fournissant ainsi un apport constant en eau aux gites potentiels.

La comparaison de gites problématique similaires démontre aussi qu'il peut y avoir de grandes disparités entre les captures observées. En effet, selon les résultats du projet sur le suivi des populations de moustiques adultes de la SOPFIM, les trois dépôts à neige suivis ont présenté des productivités différentes (Société de protection des forêts contre les

insectes et maladies, 2005e). Ceci démontre que deux mêmes types de sites problématiques n'auront pas nécessairement la même productivité. L'emplacement des pièges sur ces sites, le nombre de gites produits lors de la fonte des neiges, les conditions météorologiques lors des collectes figurent parmi les facteurs pouvant expliquer ces écarts d'un site par rapport à un autre. Il pourrait donc être pertinent d'approfondir les recherches de manière à mieux connaître les facteurs favorisant la reproduction des moustiques pour un site par rapport à un autre. Pour ces sites problématiques présentant un risque pour la population humaine, il y aurait lieu par la suite d'évaluer les aménagements possibles pour éviter qu'ils deviennent des gites potentiels.

Dans le cadre de la présente étude, aucun aménagement dans le but de limiter les populations de moustiques dans ces milieux particuliers n'a été recensé dans la littérature scientifique, mais il apparaît justifié que certains aménagements pourraient réduire de façon significative la production de moustiques dans ces habitats. Le fait d'accumuler la neige sur un terrain incliné possédant un drainage adéquat pourrait limiter grandement la présence d'eau stagnante. Le système de drainage pourrait prévoir un transport rapide de l'eau de fonte vers le réseau d'égouts pluviaux ou vers un bassin de captation conçu de façon à limiter la reproduction des moustiques. Il est possible de penser qu'un terrain incliné devrait idéalement être orienté vers le sud pour augmenter la vitesse de fonte au printemps et ainsi réduire la durée de la période propice à l'accumulation d'eau stagnante. Tout comme pour les réseaux d'égout pluviaux, il serait pertinent d'effectuer des recherches en ingénierie pour concevoir des sites de dépôt à neige limitant la reproduction des moustiques. L'implication des agences de santé publique locales et des gestionnaires de ces sites pourrait alors être requise.

3.2.7 Sites d'entreposage de pneus hors d'usage

La forme particulière et le caractère imperméable des pneus les rendent très propices à l'accumulation d'eau et, conséquemment, à la reproduction de certaines espèces de moustiques pouvant parfois être responsables de la propagation de maladies. Une étude effectuée en Ohio rapporte à cet effet que 80 % des enfants souffrant d'une maladie transmise par les moustiques vivent à moins de 92 mètres d'un site d'entreposage de pneus hors d'usage (Liu *et al*., 1998).

Au Québec, lors de relevés effectués dans plusieurs dépôts de pneus hors d'usage de la province, 11 espèces de moustiques y ont été identifiées. Des larves de *Cx restuans* se sont révélées très abondantes; *Cx pipiens* étant beaucoup plus rare (Desfor Bioservices, 2003; GDG Environnement, 2002). Oc. *atropalpus* et *Oc. triseriatus* se sont aussi révélées être très présentes dans ces types de milieu (GDG Environnement, 2002). À ce jour, aucun lot de moustiques issu de ces sites n'a été testé positif pour la présence du VNO (Desfor Bioservices, 2003). Cependant, il n'en demeure pas moins que ces sites sont favorables à la reproduction de moustiques vecteurs du VNO au Québec et pourraient donc contribuer à l'expansion du virus dans la province.

Conformément à la *Politique québécoise de gestion des matières résiduelles 1998-2008* (Gouvernement du Québec, 2000) et au *Règlement sur l'entreposage de pneus hors d'usage* (R.R.Q., c. Q-2, r.6.1) du ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs (MDDEP), les sites d'entreposage de pneus hors d'usage québécois font présentement l'objet d'un vidage progressif devant être complété, au plus tard, en décembre 2008 (Recyc-Québec, 2004; Recyc-Québec, 2001). Depuis l'arrivée du VNO au Québec, la lutte contre les moustiques a pris de l'importance et l'élimination de leurs sites potentiels de reproduction par la destruction ou le recyclage des pneus hors d'usage ajoute à l'importance de l'opération. Afin de minimiser les risques associés au VNO pour les employés et les populations habitant à proximité de sites d'entreposage et d'élimination de pneus hors d'usage, les autorités concernées ont donc exigé du gouvernement québécois la mise en place de mesures plus sécuritaires pour la manipulation des pneus depuis le lieu d'entreposage jusqu'au four de la cimenterie. La mise en ballots des pneus a été la principale méthode retenue qui consiste à presser une quantité donnée de pneus et à les attacher avec des lanières de fer (Bourque, 2001). Les pneus ainsi compactés et attachés ne représentent plus un milieu aussi propice à l'accumulation d'eau et à la reproduction des moustiques. De plus, les larves existantes dans les pneus avant la mise en ballots se font écraser lors de l'opération, mais une partie des œufs peut y résister, survivre à une période de sécheresse ou de froid prolongée et éclore si les ballots sont défaits et que de l'eau peut à nouveau s'y accumuler (GDG Environnement, 2001). Les résultats d'une étude visant à mesurer l'efficacité de la mise en ballots des pneus pour limiter la production de moustiques adultes révélaient que cette méthode réduirait le taux de productivité de moustiques de plus de 99 % par rapport aux pneus entreposés en vrac (GDG Environnement, 2001). La mise en ballots des pneus a aussi pour effet de rendre leur transport plus efficace étant donné que chaque voyage de camion comporte une plus grande quantité de pneus. Il s'agit d'un bon exemple de modification physique de l'habitat des moustiques pour en contrôler l'abondance et réduire, par le fait même, le risque de transmission du VNO.

Nonobsant la nette efficacité du procédé de mise en ballots, quelques procédés additionnels ont aussi été proposés pour compléter la mise en ballots des pneus et rendre leur manipulation encore plus sécuritaire. Il s'agit d'envelopper les ballots sous une toile imperméable et de minimiser le temps d'entreposage des ballots en les brûlant le plus rapidement possible durant la saison de reproduction des moustiques, soit de la mi-avril à la mi-octobre (GDG Environnement, 2001). Une décontamination systématique des pneus hors d'usage provenant des États-Unis limiterait aussi le risque d'introduction d'espèces exotiques, dont certaines pourraient être vecteurs du VNO ou de moustiques déjà porteurs de la maladie (Bourque, 2001).

3.3 SYNTHÈSE DES AMÉNAGEMENTS DES HABITATS FAVORABLES

Différentes méthodes modifiant physiquement les gites naturels de reproduction des moustiques ont été proposées et réalisées au début du siècle pour limiter la transmission de certaines maladies, notamment pour le contrôle de la malaria dans les régions tropicales. Ces aménagements ont été peu à peu délaissés avec l'apparition des pesticides et en raison de la

législation stricte entourant la protection et la conservation des écosystèmes aquatiques. La modification des pentes, du débit et du niveau d'eau d'un cours d'eau comportant des portions d'eau stagnante, la construction d'un réseau de fossés de drainage ainsi que la réduction de la surface occupée par de la végétation d'un marais font partie des aménagements possibles. Ces aménagements ne seraient toutefois pas pertinents dans le contexte québécois. En effet, il est plutôt rare que des espèces de moustiques vecteurs du VNO se reproduisent dans les portions lentes des cours d'eau et dans les marais d'eau salée. De plus, la législation en vigueur ne permettrait pas de modifier physiquement de tels habitats naturels en raison des impacts importants qu'ils généreraient sur les écosystèmes aquatiques.

Dans une stratégie de gestion intégrée visant à protéger la population contre le VNO, il importe de limiter autant que possible la reproduction des moustiques dans les milieux artificiels représentant un risque pour la population, en particulier lorsque ces gites sont situés à proximité des habitations humaines. L'aménagement physique des milieux artificiels les plus propices à la reproduction des espèces de moustiques vecteurs du VNO au Québec peut donc, dans certains cas, s'avérer être un moyen complémentaire aux autres mesures d'intervention pour limiter le risque de transmission du VNO et ce, dans une perspective de développement durable. Peu d'études ont toutefois été réalisées sur l'aménagement des gites artificiels de production de moustiques.

Aucun aménagement particulier ou intervention au regard des systèmes de traitement des eaux usées n'est pertinent dans le contexte québécois étant donné qu'ils ne constituent pas, à partir des connaissances acquises, des gites propices pour la reproduction de moustiques vecteurs du VNO. Il en est de même pour les réservoirs et les barrages, généralement éloignés des habitations humaines, et des fossés le long des axes routiers. Que ce soit les puisards, les réseaux d'égout pluviaux et les sites de dépôts à neige, comme ces infrastructures peuvent constituer des gites potentiels pour la reproduction des espèces de moustiques vecteurs du VNO et qu'ils sont situés à proximité des habitations humaines, il y aurait donc lieu de mener des travaux de recherche afin d'évaluer les aménagements possibles pour limiter cette problématique. Les propriétaires de terrains vagues, notamment ceux sur des sites industriels, et de terrains commerciaux devraient être sensibilisés dans un premier temps à la problématique en vue d'éliminer les gites potentiels qui pourraient occasionner un risque à la santé humaine. Pour ce qui est de l'aménagement des sites de dépôt de pneus usagés, la mise en ballots des pneus hors d'usage a déjà démontré son efficacité dans le cadre d'études réalisées au Québec.

4 ALTERNATIVES BIOLOGIQUES

Cette section dresse un bref portrait des différentes alternatives biologiques envisageables pour contrôler les populations de moustiques en soulevant notamment les avantages et les inconvénients de chacune. Il s'agit de l'utilisation de certains prédateurs naturels des moustiques, tels que les oiseaux insectivores, les chauves-souris, les insectes aquatiques et terrestres de même que les parasites et les microorganismes pathogènes. Le développement d'un vaccin contre le VNO constituerait aussi une alternative biologique, mais agirait plutôt sur les victimes potentielles de la maladie en permettant au système immunitaire de celles-ci de développer une immunité face au VNO. L'état d'avancement des travaux de recherche pour le développement d'un tel vaccin est également présenté dans cette section.

4.1 PRÉDATEURS

Pour certains auteurs, les prédateurs de moustiques que sont notamment certaines espèces d'oiseaux, de chauves-souris, de poissons et d'insectes représentent une alternative biologique au contrôle chimique des moustiques. En général, les prédateurs des stades immatures des moustiques sont plus efficaces dans une perspective de lutte biologique étant donné que les larves et les nymphes sont concentrées dans des gites permettant leur développement. Cela les rend donc plus accessibles aux prédateurs que les moustiques adultes qui sont plus dispersés dans l'espace. Par ailleurs, leur capacité de vol et leur faible activité nocturne font en sorte que les moustiques adultes évitent bien des prédateurs.

4.1.1 Oiseaux

L'efficacité de certaines espèces d'oiseaux insectivores (ex. : hirondelle, merle-bleu, engoulevent, etc.) pour contrôler les moustiques adultes semble quelque peu limitée en raison des habitudes alimentaires de ces prédateurs. En effet, bien que ceux-ci consomment des moustiques, ils ingurgitent également beaucoup d'autres insectes tels que papillons, coléoptères et pucerons (The Purple Martin Conservation Association, 2002; New York City Department of Health, 2001; Bourassa, 2000; Crans, 1996). L'efficacité prédatrice des hirondelles a d'ailleurs été surévaluée par des calculs théoriques permettant d'estimer le nombre de moustiques (unique nourriture) qu'elles devraient manger quotidiennement pour satisfaire leurs besoins énergétiques. En réalité, les moustiques ne constituent qu'un faible pourcentage de la diète des hirondelles, ces dernières optent davantage pour de plus gros insectes (New York City Department of Health, 2001; Crans, 1996).

De plus, puisque les oiseaux sont généralement actifs tôt le matin et durant la journée, alors que la plupart des espèces de moustiques vecteurs du VNO sont actives et abondantes au coucher du soleil, les périodes d'activité des oiseaux et des moustiques ne se chevauchent pas ou très peu. Les moustiques sont ainsi plus ou moins disponibles. Toutefois, selon les périodes saisonnières, certaines espèces d'oiseaux voient leur cycle de croissance de leurs jeunes coïncider avec l'abondance des moustiques.

La présence de nichoirs pour certaines espèces d'oiseaux insectivores ne serait donc pertinente pour lutter contre les populations de moustiques adultes; les mangeoires pour oiseaux sont surtout efficaces pour lutter contre l'émergence des mannes (éphémères) (Bourassa, 2006). Nonobsant ce fait, l'impact ne serait pas le même pour les moustiques puisqu'il serait difficile de bien cerner les endroits où installer ces nichoirs.

4.1.2 Chauves-souris

L'efficacité des chauves-souris pour contrôler les moustiques adultes est aussi limitée par le pourcentage peu élevé qu'occupent ces insectes dans leur régime alimentaire (Crans, 1996) et ce, même si les périodes d'activité des chauves-souris chevauchent celles des moustiques. Malgré le fait que les chauves-souris puissent consommer de grandes quantités d'insectes dans une période relativement courte, ces mammifères volants ne sont pas considérés comme des agents de contrôle des moustiques pour plusieurs raisons. D'abord, les quantités d'insectes capturés demeurent faibles en comparaison avec celles qui survivent. Lors d'une saison exceptionnellement prolifique pour les moustiques, ces prédateurs pourraient cependant en consommer davantage, mais cet effort alimentaire ne serait que temporaire, soit jusqu'à ce qu'il y ait à nouveau un équilibre entre les espèces du milieu (Bourassa, 2000). De plus, puisque les moustiques sont de petits insectes, ils fournissent très peu d'énergie aux chauves-souris. Ces dernières vont donc préférer capturer de plus gros insectes lorsque ceux-ci sont disponibles (Carrigan, 1999).

L'installation de cabanes à chauves-souris près des habitations suscite la controverse étant donné que certaines espèces ont été identifiées comme étant des vecteurs de la rage. Leur présence près des habitations humaines présente ainsi un risque potentiel pour les humains. De plus, le VNO ayant déjà été détecté chez des chauves-souris, ces prédateurs pourraient également faciliter une propagation du virus au sein de la population de moustiques (New York City Department of Health, 2001).

4.1.3 Poissons

Les poissons prédateurs des larves de moustiques ont sans doute été les premiers organismes employés dans le but précis de lutter contre les moustiques et autres diptères piqueurs. Les poissons larvivores du genre *Gambusia* sont ceux qui ont été le plus largement utilisés pour le contrôle des moustiques et ce, depuis plus de 80 ans (Knight *et al.*, 2003). Ces poissons d'environ 8 cm de long sont vivipares et présentent un taux de reproduction élevé, ce qui les rend intéressant dans une perspective de contrôle biologique. Ils peuvent vivre dans des marécages et dans des fossés, là où croissent des larves de moustiques. De plus, ils tolèrent d'importantes variations de température, de pollution organique et de salinité (Knight *et al.*, 2003; Becker *et al.*, 2003).

L'élevage de masse de certaines espèces est désormais pratiqué dans le but de les utiliser pour le contrôle des moustiques aux États-Unis. L'introduction de quelques douzaines de ces poissons larvivores dans de petits plans d'eau assurerait un bon contrôle des moustiques (Walsh, 2003). Dans certains États américains, l'espèce *Gambusia affinis* était

fréquemment introduite dans divers plans d'eau (ex. : égouts pluviaux, jardins d'eau, marécages) (Kent et Sakolsky-Hoopes, 1999). En 1925, des poissons larvivores du genre *Gambusia* ont été introduits dans les bassins d'eau sulfureuse de Banff en Alberta afin de réduire les populations de larves de moustiques qui y croissaient (Wood, 1985). Les poissons se sont multipliés et ont permis un contrôle efficace. Il semble par ailleurs que d'autres espèces de poissons, notamment des épinoches et des guppies, se soient avérées également intéressantes dans le contrôle des larves de moustiques (Bourassa, 2000).

L'utilisation de cette alternative est cependant remise en question, puisque cette espèce larvivore n'est pas indigène sur tout le territoire américain. D'ailleurs, l'utilisation de poissons prédateurs, tel que le *Gambusia*, est maintenant prohibée dans les habitats naturels de nombreux États américains. Étant donné son potentiel reproducteur élevé, *Gambusia affinis* peut devenir, une fois introduit, un compétiteur et un prédateur envers des espèces de poissons indigènes (Knight *et al.*, 2003; New York City Department of Health, 2001; Bourassa, 2000). Une fois les larves de moustiques disparues, ils s'attaquent aux œufs et aux alevins des poissons locaux. De plus, l'efficacité prédatrice des gambusies est soumise à certaines contraintes écologiques, telles que leur compétition territoriale, leur période de chasse et certaines conditions environnementales du milieu (ex. : température de l'eau).

Au Québec, il ne pourrait être envisagé de procéder à des introductions de tels poissons. En effet, l'introduction d'espèces non indigènes en territoire québécois pourrait provoquer un déséquilibre dans les écosystèmes aquatiques où ils sont utilisés, et ces poissons, qui sont reconnus pour se reproduire rapidement, risqueraient d'entrer en compétition avec les espèces locales. De plus, ces espèces ne pourraient s'adapter et survivre aux conditions climatiques québécoises. L'utilisation d'espèces indigènes comme l'épinoche à cinq épines (*Culaea inconstans*) serait préférable, mais l'évaluation de l'efficacité de ces espèces pour réduire les populations larvaires de moustiques reste à préciser. Des études plus poussées sur la biologie, l'écologie et le comportement de ces poissons ainsi que sur les impacts possibles sur l'écosystème aquatique seraient nécessaires.

4.1.4 Insectes aquatiques et terrestres

En ce qui concerne les insectes aquatiques prédateurs (ex. : dytique, gyrin, punaise d'eau, notonecte, scorpion d'eau, larves de libellules et d'éphémères, etc.), ils n'ont jamais démontré de véritables succès dans le contrôle des larves et des nymphes de moustiques en raison de leur comportement, de leur cycle vital complexe et parfois non synchrone avec celui d'une espèce de moustiques visée ainsi que de la difficulté à les produire massivement en vue de les vendre sur le marché (Bourassa, 2000). Par exemple, en milieu naturel, les libellules sont bel et bien présentes dans les plans d'eau, mais généralement en faibles nombres. En vue d'un contrôle des larves de moustiques, des larves de libellules peuvent être introduites, mais certaines d'entre elles nécessitent de un à cinq ans pour atteindre le stade d'adulte. Quant à leur habitude alimentaire, ces larves ont un caractère cannibalesque et ne démontrent pas de sélectivité envers les autres organismes. D'après des recherches menées sur le terrain, aucune n'aurait permis de constater la performance des larves de libellules comme agent de contrôle biologique (New York City Department of Health, 2001).

4.2 PARASITES

Les parasites comprennent tous les invertébrés multicellulaires qui complètent au moins une phase de leur cycle de développement à l'intérieur d'un seul hôte. Parmi les parasites les plus importants des larves de moustiques figurent les nématodes (Wood, 1985). Plusieurs espèces de nématodes de la famille des *Mermithidae* colonisent des milieux aquatiques permanents et temporaires et, par leur mode de vie comme parasite, s'avèrent être des agents de contrôle biologique intéressants (Becker *et al.*, 2003). Lorsque les conditions du milieu aquatique ou les conditions environnementales sont favorables, de minuscules larves de nématodes (10-20 mm) sortent de leurs œufs. Ces jeunes larves pénètrent la cuticule d'une larve de moustique, y poursuivent leur croissance et après une ou quelques semaines sortent de la larve, la tuant du même coup. Après accouplement des parasites, les femelles pondent leurs œufs sur le fond du plan d'eau, et le cycle recommence.

Néanmoins, plusieurs facteurs limitent le recours à des parasites pour le contrôle des moustiques. Il s'agit de leur abondance, de leur disponibilité et des difficultés de pratiquer des élevages de masse afin de procéder à des introductions massives pour contrôler les stades immatures ou les adultes qui s'avèrent souvent très abondants sur de courtes périodes de temps.

4.3 MICROORGANISMES PATHOGÈNES

Au cours des deux dernières décennies, des efforts importants ont été déployés, et ce, à une échelle internationale pour trouver des microorganismes pathogènes en vue de contrôler les moustiques. Ces microorganismes incluent les champignons, les bactéries et les virus. Selon les sources consultées aucune formulation à base de champignons ou de virus n'est actuellement homologuée au Canada et aux États-Unis, bien qu'il s'agisse d'une alternative intéressante. Pour des raisons commerciales, les producteurs ne sont pas enclins à investir dans cette avenue : les coûts de production sont élevés, la vie du produit sur tablette est courte, les conditions d'entreposage sont à froid en plus d'une utilisation compliquée ce qui souvent entraîne souvent une mauvaise efficacité sur le terrain (Boisvert, 2006).

Il existe plusieurs espèces de champignons entomopathogènes qui s'attaquent aux diptères piqueurs et elles sont regroupées dans trois groupes, soit les *Mastigomycotina*, les *Entomophthorales* et les *Deuteromycetes*. Le premier groupe comprend des champignons vivant dans l'eau dont les zoospores sont mobiles grâce à leur flagelle. Lorsque la zoospore rencontre un hôte adéquat, elle pénètre et développe un mycélium qui tuera la larve de moustique. Les champignons appartenant à ce groupe s'attaquent à plus de cinquante espèces de moustiques (Becker *et al.*, 2003). Les champignons présentant le plus de potentiel comme agent de lutte biologique appartiennent à ce groupe. Quant aux *Entomophthorales*, le deuxième groupe, ils produisent des conidies qui infectent principalement les insectes terrestres ou les stades immatures des insectes. Par exemple, *Entomophtora culicis* peut infecter un moustique adulte lorsqu'il émerge de sa pupe. Enfin, les *Deuteromycetes* tels que *Beauveria* sp., *Metarhizium* sp. et *Vertcillium* sp. ne sont pas

des pathogènes primaires et ne sont pas des hôtes spécifiques des moustiques. Cependant, leurs conidies peuvent infecter les insectes en situation de stress; par exemple, des moustiques adultes lors de l'hibernation.

Les bactéries ayant la capacité de tuer les larves de moustiques sont connues depuis plusieurs décennies. Les propriétés larvicides du *Bacillus sphaericus* (*Bsph*) ont été mises en évidence à la suite de recherches effectuées dans les années 70 et 80 (Mulla *et al*., 2003). La bactérie *Bacillus thuringiensis* (*Bt*), une bactérie Gram-positive ubiquiste dans le sol et formant des endospores, a été découverte en 1976 (Lacoursière et Boisvert, 2004). Ces larvicides biologiques sont décrits plus en détails au chapitre 5 du présent document. Enfin, dans les années 90, une bactérie anaérobique vivant dans le sol et appartenant au genre *Clostridium* a été découverte, mais celle-ci présente un faible effet toxique sur les larves de moustiques (Seleena *et al*., 1997).

Comparativement aux bactéries, beaucoup moins d'efforts de recherche ont été consacrés aux virus. Selon la littérature consultée, aucun des virus ne semble avoir jusqu'à présent un bon potentiel pour un contrôle efficace des moustiques et autres diptères piqueurs (mouches noires). Les virus polyédriques s'attaquant au noyau ou au cytoplasme ne sont pas très fréquents chez les diptères contrairement à ce qui est observé chez les lépidoptères (papillons).

4.4 VACCINATION

Aucun vaccin n'est présentement disponible pour prévenir les infections au VNO chez les humains, mais de nombreuses compagnies y travaillent. Depuis quelques années, plusieurs recherches ont été entamées sur différentes molécules qui pourraient éventuellement permettre le développement d'un traitement contre le VNO. Un vaccin à l'essai a notamment permis de protéger efficacement les hamsters contre le VNO un mois après l'injection (Tesh *et al*., 2002) et à la suite de ces tests, des essais cliniques sur des humains devaient être entamés (Nalca *et al*., 2003). L'étude d'Oliphant *et al.* (2005) portant sur les anticorps monoclonaux apporte des espoirs particulièrement intéressants dans le traitement du VNO. Lors de tests sur des souris malades, un anticorps nommé E16 s'est avéré très efficace même après une seule injection administrée cinq jours après le début de l'infection alors que le système nerveux central (SNC) était déjà atteint par le virus. Chez les souris traitées, le virus a disparu du cerveau neuf jours après le début de l'infection (donc quatre jours après l'injection) dans 68 % des cas et 90 % des souris ont survécu à la maladie comparativement à environ 10 % chez les souris non traitées. La structure de cet anticorps permettrait d'ailleurs une transformation relativement simple pour faciliter éventuellement son utilisation sur les humains (Oliphant *et al*., 2005).

Un vaccin pour les chevaux (Chimerivax^{TM}) est disponible depuis 2001 (Koné *et al*., 2003). Un rappel doit être assuré annuellement et son efficacité est de 94 %. Ce vaccin est suspecté de provoquer des avortements, des mort-nés et des déformations chez les

nouveau-nés lorsqu'injecté à une jument (International Society For Infectious Diseases, 2003).

4.5 SYNTHÈSE DES ALTERNATIVES BIOLOGIQUES

Bien que les alternatives biologiques paraissent de moindre impact sur l'environnement que le recours à des produits chimiques, un souci de l'équilibre écologique présent dans les divers écosystèmes où vivent les moustiques doit cependant être pris en compte lors de l'emploi d'une telle solution. Leur efficacité dans le contrôle des moustiques est aussi très variable et la mise en place de certaines d'entre elles n'est pas pertinente dans le contexte québécois.

La recherche montre que l'usage de prédateurs naturels est peu pertinent pour le contrôle des moustiques. En effet, les oiseaux insectivores et les chauves-souris se nourrissent de façon sélective et les moustiques ne présentent qu'un très faible pourcentage de leur régime alimentaire. D'ailleurs, lorsque disponibles, de plus gros insectes sont préférés aux moustiques qui ne fournissent qu'un faible rapport énergétique. De plus, l'utilisation de chauves-souris pour le contrôle des moustiques pourrait représenter une menace à la santé humaine puisque plusieurs espèces constituent elles-mêmes un vecteur potentiel d'une de la rage. Bien que les poissons prédateurs des larves de moustiques, dont *Gambusia*, ont été largement utilisés dans le passé et se sont avérés efficaces dans certaines conditions, leur utilisation est maintenant controversée. L'introduction de poissons prédateurs non indigènes à nos écosystèmes québécois ne serait acceptable puisqu'une telle intervention affecterait la biodiversité du milieu. Par ailleurs, l'efficacité des insectes aquatiques prédateurs n'a jamais été démontrée.

Différentes espèces de parasites pourraient être efficaces contre les moustiques aux stades larvaire ou adulte, mais plusieurs paramètres contraignent leur utilisation, tels que leur disponibilité et les difficultés de pratiquer des élevages de masse. Des efforts importants de recherche ont aussi été déployés dans les dernières années afin de trouver des microorganismes pathogènes en vue de contrôler les moustiques. Outre les bactéries qui sont abordées dans le chapitre suivant, certains champignons présenteraient un potentiel comme agent de lutte biologique pour les moustiques. Selon la littérature consultée, aucun virus ne semble être efficace pour le contrôle des moustiques.

Plusieurs compagnies travaillent actuellement sur le développement d'un vaccin pour prévenir les infections au VNO chez les humains contre le VNO. Ce vaccin constituerait une alternative biologique en agissant plutôt sur les victimes potentielles de la maladie en permettant au système immunitaire de celles-ci de développer une immunité face au VNO.

5 TRAITEMENTS AUX LARVICIDES

Au Québec, les insecticides pouvant être utilisés dans le contrôle vectoriel afin d'assurer la protection de la population contre le VNO doivent être préalablement homologués par l'Agence de réglementation de la lutte antiparasitaire (ARLA) (voir Chaussé *et al*., 2005 pour plus de détails). Les larvicides correspondent aux insecticides utilisés pour éliminer les larves de moustiques. Le *Bacillus thuringiensis* variété *israelensis* (*Bti*), le méthoprène, le *Bacillus sphaericus* (*Bsph*), le diflubenzuron, le chlorpyrifos et le malathion figurent parmi les ingrédients actifs actuellement homologués au Canada pouvant être utilisés pour le contrôle des larves de moustiques.

En 2002, l'INSPQ réalisait à la demande du MSSS une évaluation des différents larvicides homologués au Canada afin de déterminer quels étaient ceux présentant la meilleure innocuité (Chevalier *et al*., 2002). Ces travaux révélaient que le diflubenzuron, le chlorpyrifos et le malathion, bien qu'ils soient homologués, ne devaient pas être privilégiés pour le contrôle vectoriel du VNO sur le territoire québécois en raison notamment de leur toxicité envers des espèces non ciblées (Ellis, 2004) et qu'ils impliquent des cas d'intoxication (Samuel et St-Laurent, 2005). De plus, l'utilisation du chlorpyrifos à proximité des habitations humaines est graduellement abandonnée (Agence de réglementation de la lutte antiparasitaire, 2001a) et le malathion serait corrosif pour les métaux et pourrait détériorer certains plastiques, caoutchoucs et autres revêtements. En raison de son odeur nauséabonde, son utilisation peut être considérée par le fait même moins acceptable par la population humaine (Samuel et St-Laurent, 2005). Ces larvicides n'étant pas privilégiés d'entrée jeu, ils ne sont abordés dans ce rapport.

Ce chapitre se veut une synthèse des informations consignées dans des rapports scientifiques antérieurs et une mise à jour de certaines données afin d'apprécier les risques potentiels pour l'environnement et la santé humaine associés à l'utilisation du *Bti*, du méthoprène et du *Bsph* pour contrôler la transmission du VNO. Pour chacun, leur mode d'action et leur efficacité à détruire les larves de moustiques sont décrits de même que leurs répercussions sur l'environnement et sur la santé humaine.

5.1 *BACILLUS THURINGIENSIS ISRAELENSIS*

Le *Bacillus thuringiensis* variété *israelensis* (*Bti)* est une bactérie aérobie (anaérobie facultative) ubiquiste dans le sol naturellement présente dans l'environnement dans de nombreuses régions du monde. Ainsi, depuis sa découverte en Israël en 1976, le *Bti* a été isolé à partir d'échantillons d'eau, d'insectes et de sols provenant de plus de quinze pays différents (de Barjac, 1990 [tiré de Lacoursière et Boisvert, 2004]). Toutefois, au Québec, une étude récente portant sur cette variété de *Bt* n'a pu en confirmer sa présence naturelle dans notre environnement. En effet, parmi les quinze sites d'échantillonnage retenus, un seul isolat indigène provenant d'un site vierge n'ayant jamais fait l'objet d'un traitement au *Bti* a été identifié à la fois par microscopie, par sérotypage et par génotypage. De plus, cette

souche s'est révélée identique à celle utilisée dans les produits commerciaux (Masson *et al*., 2003) ce qui soulève des questions sur son origine.

Le *Bti* fait partie de la grande famille des *Bt* qui ont la particularité de pouvoir tuer certains insectes. Son utilisation en tant que larvicide a jusqu'à maintenant connue un grand succès dans une trentaine de pays puisqu'il s'agit d'un produit biologique alliant efficacité et sécurité environnementale (Agence de réglementation de la lutte antiparasitaire, 2001c). Homologué au Canada en 1982, le *Bti* est le produit le plus largement utilisé pour contrôler les insectes piqueurs au Québec depuis 1984. D'ailleurs, plusieurs confondent les interventions menées par le MSSS visant à éliminer ou à réduire de façon importante les populations de moustiques vecteurs du VNO avec les programmes visant à réduire les populations de moustiques responsables de la nuisance. Le lecteur est invité à consulter l'annexe A du présent document pour mieux distinguer ces traitements ayant des objectifs différents.

5.1.1 Mode d'action

Le *Bti* est une bactérie capable de sporuler et de germer selon certaines conditions environnementales et selon la disponibilité de la matière nutritive. La particularité du *Bti* est sa capacité, parallèlement et de façon synchrone à la sporulation, de produire une inclusion cristalline, formée d'un ou de plusieurs types de protéines selon les souches. Les protéines qui composent le cristal sont appelées endotoxines-delta (δ-endotoxines) et, selon leur composition, agissent de manière spécifique contre les moustiques. En plus des δ-endotoxines, le *Bti* possède une protéine appelée facteur hémolytique qui s'associe aux autres protéines pour former un complexe cristallin actif contre les moustiques et les mouches noires (Agence de réglementation de la lutte antiparasitaire, 2001c).

L'effet larvicide du *Bti* est donc produit par les toxines protéiques libérées lors de sa sporulation et qui agissent au niveau du système digestif des larves de moustiques. Lorsque ces protéines traversent le système digestif des larves, elles sont transformées, par les enzymes et le pH particulièrement basique qui caractérise ces familles d'insectes, en protéines toxiques qui détruiront éventuellement les parois du système digestif et entraîneront la mort rapide de la larve. Par la suite, il se produit une cascade de réactions qui, finalement, causent la destruction de la paroi intestinale et la mort rapide de la larve.

À partir du moment où les cristaux de *Bti* sont présents en quantités suffisantes dans le milieu, une larve doit, pour être affectée (Lacoursière et Boisvert, 2004; Chappuis, 2002; Boisvert et Boisvert, 2000) :

- capturer et ingérer l'inclusion cristalline;
- avoir un système digestif très alcalin pour solubiliser le cristal;
- avoir des enzymes capables de rendre les protéines actives par clivage protéolytique;
- avoir les récepteurs intestinaux compatibles avec les protéines solubilisées, permettant la liaison à l'intestin.

Lorsqu'il est utilisé pour le contrôle des moustiques, le *Bti* est directement appliqué dans l'eau par voie terrestre, quoique certaines formulations puissent aussi être appliquées par voie aérienne (Agence de réglementation de la lutte antiparasitaire, 2001c). L'utilisation du *Bti* peut être combinée à d'autres mesures de contrôle des moustiques dans le cadre de programmes de lutte intégrée.

Au Canada, différentes formulations commerciales sont homologuées (VectoBac, Teknar et Aquabac) et sont disponibles sur le marché sous forme de granules ou de solution aqueuse.

5.1.2 Efficacité

En raison de la complexité de son mode d'action, le *Bti* est un insecticide très spécifique. En 1998, Glare et O'Gallaghan rapportaient que 115 espèces de moustiques et 40 espèces de mouches noires pouvaient être contrôlées avec le *Bti* (Glare et O'Callaghan, 1999). Cependant, les différents genres de moustiques ne possèdent pas la même sensibilité au *Bti* dépendamment des particularités comportementales et physiologiques de chaque espèce. En général, les larves de *Culex (Cx)* sont les plus susceptibles, les larves d'*Aedes (Ae.)* et d'*Ochlerotatus* (Oc.) sont autant ou légèrement moins susceptibles et les larves d'*Anopheles (An.)* sont les plus résistantes lorsqu'elles sont exposées à la même quantité de cristaux de *Bti.* Ainsi, les larves des genres *Culex*, *Aedes* et *Ochlerotatus* nécessitent une quantité moindre de *Bti* que les larves d'*Anopheles* pour un résultat équivalent (Lacoursière et Boisvert, 2004). Aussi, il peut exister des différences de sensibilité entre les espèces d'un même genre (Boisvert et Boisvert, 2000).

Certains facteurs, tels que le comportement alimentaire des larves et leur stade de transformation, influencent grandement l'efficacité du larvicide. Chez la plupart des espèces étudiées, les larves les plus jeunes sont plus susceptibles au *Bti* que les plus âgées (Lacoursière et Boisvert, 2004). Des facteurs environnementaux peuvent également affecter la persistance et l'efficacité du *Bti* comme la densité des larves, la matière organique en suspension, la température de l'eau, les facteurs climatiques, la profondeur de l'eau et le rayonnement ultraviolet (Fuligni, 2001; Boisvert et Boisvert, 2000; Glare et O'Callaghan, 1998). Ainsi, une quantité de cristaux plus élevée est donc nécessaire lorsque le nombre de larves par unité de volume est élevé, que le gite contient plus de matière organique et que la mare à traiter est profonde (Lacoursière et Boisvert, 2004).Habituellement, une même quantité de cristaux de *Bti* induit un taux de mortalité inférieur en eau froide qu'en eau chaude (Nayar *et al*., 1999) en raison d'une réduction de l'activité métabolique des larves de moustiques. Une luminosité trop intense réduit l'activité larvicide des cristaux de *Bti* (Becker *et al*., 1992; Becker et Margalit, 1993 [tirés de Lacoursière et Boisvert, 2004]).

Généralement, l'efficacité du *Bti* ne persiste pas très longtemps après une application. Sa toxicité contre les moustiques ne dure que quelques jours et l'efficacité peut diminuer en moins de 24 heures (Glare et O'Callaghan, 1998). Enfin, la puissance, la concentration, la vitesse de pénétration ou de sédimentation du produit et des agents de la formulation influencent aussi l'efficacité (Becker *et al.*, 2003).

La Société de protection des forêts contre les insectes et maladies (SOPFIM), mandatée par le MSSS pour la mise en œuvre de l'application de larvicides en prévention dans le cadre du *Plan d'intervention gouvernemental de protection de la santé publique contre le VNO*, a effectué un suivi de l'efficacité des traitements au *Bti*. Ces traitements au *Bti* étaient principalement effectués dans les régions boisées de grandes et de petites surfaces, les secteurs à aires ouvertes, les fossés, etc. Les observations faites sur le terrain indiquaient que le *Bti* est efficace à plus de 95 % contre les larves de moustiques (Société de protection des forêts contre les insectes et maladies, 2003).

5.1.3 Résistance

L'utilisation de produits insecticides à répétition comporte souvent un problème de développement de résistance chez les insectes cibles. Au Québec, les produits à base de *Bti* sont utilisés depuis le début des années 80 dans des programmes de contrôle des moustiques et des mouches noires. Jusqu'à maintenant, il ne semble pas y avoir de cas documenté de résistance au *Bti* dans les populations naturelles de moustiques (World Health Organization, 1999). Récemment, il a été démontré qu'après plus de dix ans de traitements insecticides avec du *Bti* dans la zone humide des Bolle di Maganino, en Suisse, les larves de moustiques du genre *Aedes* étaient toujours aussi sensibles et elles ne présentaient pas de résistance envers le *Bti* (Chappuis, 2002). En Allemagne, après dix ans d'utilisation du *Bti*, aucun signe de résistance n'a été observé (Becker, 1997).

La faible propension des moustiques à développer une résistance au *Bti* pourrait probablement s'expliquer par le fait que l'activité insecticide de cette sous-espèce de *Bt* diffère des autres en raison d'un plus grand nombre de protéines toxiques. En effet, en plus des trois protéines Cry, le *Bti* produit une protéine cytotoxique unique appelée CytA qui semble agir différemment. Ce mode d'action particulier du CytA et sa relation synergique avec les protéines Cry pourraient expliquer la faible capacité des moustiques à développer une résistance au *Bti*. Des chercheurs de l'Université de Californie ont rapporté que des niveaux élevés de résistance, chez *Cx quinquefasciatus*, envers les protéines Cry, pouvaient être supprimés ou fortement atténués en combinant des protéines Cry à des taux sublétaux de protéines CytA (Wirth *et al*., 1997).

5.1.4 Effets sur l'environnement

Il est estimé que les risques présentés par le *Bti* pour les organismes non visés sont négligeables à nul, d'autant plus que les cristaux à l'origine de l'effet toxique sont dégradés rapidement dans l'environnement par les rayons solaires et les microorganismes (Agence de réglementation de la lutte antiparasitaire, 2001c).

Les cristaux protéiques du *Bti* sont plus spécifiquement toxiques contre les moustiques, les mouches noires ainsi que plusieurs espèces de moucherons appartenant à la famille des chironomidés. Même si les prédateurs aquatiques, tels que certaines espèces de poissons, se nourrissent, à une étape ou l'autre de leur vie, presque exclusivement de chironomidés, en l'absence de ces derniers, ils trouveront d'autres sources de nourriture (Agence de

réglementation de la lutte antiparasitaire, 2001c). De plus, toutes les espèces de moucherons ne seront pas affectées de la même manière et le taux de mortalité chez les espèces qui sont les plus touchées ne sera jamais de 100 % (Pont *et al*., 1999). D'ailleurs, aux doses normales utilisées, ces espèces seront peu affectées. Enfin, il est important de noter qu'à l'occasion des programmes de contrôle des moustiques, les traitements sont localisés. Ils ne risquent donc pas d'entraîner l'extinction d'une espèce cible ou d'une espèce non visée. Généralement, outre les larves de quelques familles de l'ordre des diptères, les invertébrés aquatiques, marins ou estuariens tels que les crustacés, les mollusques et les nématodes ne sont que peu affectés par le *Bti* aux doses qui sont prescrites dans le cadre de la lutte au VNO (Boisvert et Boisvert, 2000; Glare et O'Callaghan, 1998).

Les oiseaux sont parmi les vertébrés qui pourraient être affectés à la suite de traitements avec du *Bti* sur des sites de reproduction des moustiques. Les données à propos du dénombrement de dix-neuf espèces d'oiseaux nicheurs des marécages du Minnesota ont cependant démontré que des traitements au *Bti* et au méthoprène n'avaient pas eu d'effets sur le nombre d'espèces et sur les individus (Hanoski *et al*., 1997b). En fait, selon les auteurs, la prédation naturelle ainsi que les conditions météorologiques ont probablement eu plus d'effets sur les espèces présentes que les traitements à l'aide de ces deux larvicides. D'autres études ont rapporté des résultats similaires (Lawler *et al*., 1999; Niemi *et al*., 1999).

En résumé, à la lumière des études disponibles, l'utilisation du *Bti* pour le contrôle des insectes est un produit sécuritaire pour l'environnement. Il semble répondre à toutes les exigences environnementales puisque, d'une manière générale, aucun effet néfaste n'a été observé contre les organismes non ciblés comme les invertébrés, les vertébrés aquatiques et non aquatiques, les poissons et les oiseaux (Chappuis, 2002). En Allemagne, après plus d'une décennie d'utilisation contre les moustiques des genres *Aedes* et *Culex*, et ce, sur une superficie de plus de 1 000 km^2 de sites de reproduction, des réductions des populations de l'ordre de 90 % ont été observées sans qu'il y ait une évidence quelconque d'un effet sur l'environnement (Becker, 1997). Le *Bti* a également été utilisé de façon intensive ailleurs en Europe, aux États-Unis et en Afrique sans observer d'effets significatifs sur le plan environnemental (Glare et O'Callaghan, 1998).

5.1.5 Effets sur la santé

Il existe peu de données spécifiques portant sur la toxicité de la variété *israelensis* de *Bacillus thuriengiensis* (*Bt*). Toutefois, aux États-Unis, l'United States Environmental Protection Agency (US EPA) considère qu'en raison des similitudes entre les différentes souches de *Bt*, il est permis de retenir les données sur les effets toxicologiques et écologiques des souches déjà homologuées pour appuyer la demande d'une nouvelle homologation (Glare et O'Callaghan, 1998). Selon cette approche, l'US EPA évalue la toxicité globale du *Bt* sans nécessairement faire référence aux différentes sous-espèces. Dans un récent document de décision à propos de l'admissibilité du *Bt* à la ré-homologation (United States Environmental Protection Agency, 1998c), l'organisme indiquait qu'aucun effet connu sur la santé des mammifères n'avait été démontré dans les évaluations expérimentales du pouvoir infectieux et pathogène des formulations de *Bt*.

Dans le cadre des applications de larvicides en prévention réalisées par la SOPFIM en 2003, un suivi environnemental au niveau des prises d'eau potable a été effectué (Société de protection des forêts contre les insectes et maladies, 2003). Au total, 59 échantillons ont été prélevés à neuf puits d'approvisionnement en eau potable situés à proximité des secteurs traités. Le *Bt* n'a pas été détecté dans 66 % des échantillons, alors qu'il était présent, mais à des concentrations inférieures à 10 UFC/L dans 13,5 % des échantillons. La présence de *Bt* a donc été mesurable dans 20 % des cas avec une concentration moyenne de 42 UFC/L. En 2005, sur les 18 échantillons prélevés dans quatre puits privés d'approvisionnement en eau potable, le *Bti* a été détecté dans 22 % des échantillons à des concentrations variant entre $0{,}004 \times 10^4$ et $3{,}3 \times 10^4$ UFC/L (Société de protection des forêts contre les insectes et maladies, 2005f).

À la lumière des données expérimentales et des données sur l'exposition humaine disponibles actuellement, il semble que l'utilisation du *Bt* à l'intérieur d'un programme de contrôle préventif des insectes piqueurs ne devrait pas présenter de risques notables pour la santé des populations. Les rares effets rapportés au sujet des animaux de laboratoire ont été observés à des doses auxquelles la population ne sera jamais exposée. Les effets qui pourraient se manifester sont des symptômes irritatifs au niveau des yeux et du système respiratoire ainsi que de l'assèchement cutané. Par ailleurs, les observations faites à l'intérieur de vastes programmes de contrôle des insectes, au Québec ou ailleurs, n'ont pas permis de mettre en évidence d'effets particuliers attribuables à ce larvicide. Le *Bti* présente donc apparemment très peu de dangers directs ou indirects pour la santé humaine.

5.2 METHOPRENE

Le méthoprène est un larvicide chimique, homologué au Canada en 1977, pouvant être utilisé pour le contrôle des insectes piqueurs. Le méthoprène est un régulateur de la croissance des insectes à action non toxique (Agence de réglementation de la lutte antiparasitaire, 2001b). Il agit contre une grande variété d'invertébrés aquatiques, mais son impact environnemental est malgré tout restreint en raison de la rapidité avec laquelle il est dégradé. De plus, cet insecticide ne présente pas de risque sérieux pour la santé humaine si les instructions d'utilisation qui apparaissent sur l'étiquette sont respectées (Agence de réglementation de la lutte antiparasitaire, 2001b). Le méthoprène est actuellement le deuxième produit le plus utilisé pour le contrôle des larves d'insectes piqueurs.

Le méthoprène est une molécule de synthèse. Il s'agit d'un ester à longue chaîne hydrocarbonée (isopropyl [2e, 4e]-11 méthoxy-3,7,11-triméthyl-2-4-dodécadiènoate). Il agit en imitant l'action des hormones juvéniles régulant la croissance et la métamorphose des insectes. En raison de son action, l'US EPA le définit comme un insecticide biochimique plutôt que comme un insecticide traditionnel. Le méthoprène est particulièrement efficace contre les insectes de l'ordre des diptères, mais il a également un effet inhibiteur sur certains insectes appartenant à d'autres ordres, tels les coléoptères, les hémiptères, les hyménoptères ou les lépidoptères.

5.2.1 Mode d'action

Le méthoprène est un produit analogue à une hormone juvénile qui agit de façon non toxique en interrompant le cycle vital de nombreux insectes, dont les moustiques et les mouches noires. Ainsi, l'insecte touché meurt avant d'avoir complété son cycle vital et ne peut pas, par conséquent, se reproduire. Le stade du cycle de vie affecté par le traitement ne correspond généralement pas au stade de vie dans lequel se trouve l'insecte au moment du traitement (Glare et O'Callaghan, 1999). Par exemple, une larve de *Culex* traitée avec le méthoprène au quatrième stade ne pourra émerger de son exosquelette larvaire durant la mue larvaire-pupale ou encore, elle sera incapable de détacher ses pattes et ses ailes au moment de la mue pupale pour atteindre le stade adulte, ce qui, dans un cas comme dans l'autre, entraînera sa mort (Glare et O'Callaghan, 1999). Les larves des insectes ayant subi un traitement à l'aide de méthoprène n'atteignent donc jamais le stade adulte et ne peuvent ainsi ni piquer, ni se reproduire (Agence de réglementation de la lutte antiparasitaire, 2001b). La réponse au traitement variera selon les insectes traités. Les moustiques ayant atteint les derniers stades larvaires ou le stade pupal, seront les plus affectés.

Lorsqu'il est utilisé pour le contrôle des moustiques, le méthoprène est directement appliqué dans l'eau, dans les puisards de rues où le *Bti* n'est apparemment pas efficace (Agence de réglementation de la lutte antiparasitaire, 2001b). L'utilisation du méthoprène peut être combinée à d'autres mesures de contrôle des moustiques dans le cadre de programmes de lutte intégrée. Au Canada, l'appellation commerciale du méthoprène est « Altosid® ». Il est disponible sur le marché sous forme de granules ou de pastilles (Agence de réglementation de la lutte antiparasitaire, 2001b). L'ARLA homologuait récemment, en novembre 2005, une autre formulation commerciale sous forme de granules, le « Pre-Strike® », pouvant faire l'objet d'un usage domestique dans les eaux stagnantes où se développent les larves de moustiques (Agence de réglementation de la lutte antiparasitaire, 2005b).

5.2.2 Efficacité

Afin de valider certaines informations de la littérature et de mieux comprendre le comportement du méthoprène dans nos conditions québécoises, quelques projets ont été réalisés en laboratoire par la SOPFIM (Société de protection des forêts contre les insectes et maladies, 2003). L'efficacité de trois doses différentes de méthoprène (0,7 g, 3,5 g et 7,0 g par puisard) sur le taux d'émergence des larves a été comparée de manière à documenter les raisons justifiant une prescription à 5,0 g par puisard.

Parallèlement aux applications de méthoprène dans les puisards de certaines régions du sud québécois qui a eu lieu ces dernières années avec l'arrivée du VNO au Québec, la SOPFIM a également assuré un suivi de l'efficacité de cet insecticide pour réduire les larves de moustiques de 2003 à 2005. Le suivi de l'efficacité s'est basé sur l'utilisation de pièges visant à capturer les moustiques adultes émergeants des puisards. Comparativement au *Bti* par exemple, où les résultats d'efficacité sont perceptibles visuellement sur le terrain au moins 24 heures à la suite du traitement (présence de larves mortes), le méthoprène ne confirmera son efficacité qu'à la fin du cycle de développement larvaire par la présence de nymphes

mortes et/ou par l'absence d'émergence des adultes. Tout au long du processus d'action du méthoprène, les larves demeurent vivantes.

La comparaison entre les résultats obtenus dans des secteurs traités et ce qui a été enregistré dans des secteurs non traités semble indiquer une grande efficacité du méthoprène dans la réduction de l'émergence des moustiques adultes. En effet, d'après les lectures effectuées sur les pièges dans le cadre du suivi de 2005, pas moins de 67,8 % des puisards répartis dans 17 secteurs non traités ont laissé émerger des moustiques adultes en cours de saison comparativement à seulement 14,8 % pour les 11 secteurs traités échantillonnés (sur un total de 14) (Société de protection des forêts contre les insectes et maladies, 2005f). Les chiffres amassés lors des années précédentes étaient tout aussi éloquants, alors que des taux d'émergence de 50,4 % (2004) et de 81,2 % (2003) avaient été notés pour les régions non traitées comparativement à 9,7 % (2004) et 16,6 % (2003) pour les régions traitées (Société de protection des forêts contre les insectes et maladies, 2004; Société de protection des forêts contre les insectes et maladies, 2003). Ces statistiques ne tiennent compte que des puisards contenant des larves de moustiques lors de la lecture des pièges. Non seulement les puisards laissant émerger des moustiques adultes se font-ils significativement plus rares dans les secteurs traités, mais dans les cas où une émergence est observée, beaucoup moins de moustiques sont capturés pour les puisards de ces secteurs que pour les puisards des secteurs témoins. En effet, pour les puisards démontrant une émergence, une moyenne de 4,63 moustiques par piège a été maintenu dans les régions traitées en 2005 par rapport à 14,36 moustiques par piège pour les régions non traitées (Société de protection des forêts contre les insectes et maladies, 2005f). D'après ces résultats, le méthoprène apparaît donc comme étant un produit très efficace pour réduire l'émergence de moustiques adultes dans les puisards.

5.2.3 Résistance

Des études antérieures semblent démontrer que le méthoprène peut être à l'origine du développement d'une résistance chez les moustiques. Dans une étude en laboratoire, des larves de la sous-espèce *Cx pipiens fatigans* pouvaient développer rapidement une résistance au méthoprène, et ce, après aussi peu que huit générations exposées à des concentrations inhibant de 50 % l'émergence des adultes (Brown *et al.,* 1974 [tiré de Glare et O'Callaghan, 1999]). Il existe cependant peu de données à propos du développement d'une résistance au méthoprène à la suite de son utilisation sur le terrain. Récemment, Dame *et al.* ont démontré qu'en Floride, une souche insulaire de moustiques du genre *Aedes* était près de quinze fois plus résistante qu'une souche recueillie sur le continent (Dame *et al.,* 1998 [tiré de Glare et O'Callaghan, 1999]). La population insulaire de moustiques avait été exposée pendant cinq ans à des briquettes de S-méthoprène. Cela démontre qu'une résistance peut se développer dans des populations naturelles, et ce, même à de faibles doses de méthoprène. Aussi, des différences de susceptibilité ont été observées en laboratoire entre des souches de *Cx quinquefasciatus* provenant de France et de Cuba (Navarro-Ortega *et al.,* 1991 [tiré de Glare et O'Callaghan, 1999]). La dose nécessaire pour tuer 50 % des larves de la souche cubaine était huit fois supérieure à celle provoquant le même effet dans la souche française, et ce, même si le méthoprène n'a jamais été utilisé à

Cuba. Cela pourrait s'expliquer par l'existence d'une résistance croisée avec d'autres insecticides utilisés en santé publique ou en agriculture.

La résistance au méthoprène n'a pas été étudiée au Québec et on ne connaît pas l'importance que ce phénomène pourrait jouer dans la lutte contre les vecteurs du VNO qui se reproduisent dans les puisards urbains (c'est-à-dire principalement les espèces du genre *Culex*). Il est toutefois possible de penser que la colonisation des puisards par des moustiques issus d'autres milieux de développement pourrait freiner le développement d'une résistance à ce larvicide de même qu'une utilisation combinée avec un autre produit comme le *Bsph*. Les conditions climatiques québécoises limitent également un usage prolongé des insecticides.

5.2.4 Effets sur l'environnement

Contrairement au *Bti*, le méthoprène est beaucoup moins sélectif et peut affecter directement plusieurs types différents d'insectes et d'invertébrés. En ce qui concerne plus particulièrement les invertébrés aquatiques, le méthoprène serait toxique à certaines doses pour des scolytes aquatiques, quelques espèces de zooplanctons et d'autres petits crustacés (Fuligni, 2001). Certaines études auraient également démontré des effets sur le développement et la reproduction de certains crustacés dont le crabe des vases, le crabe bleu, la crevette des salines et les mysides (Fuligni, 2001). Cependant, les effets observés parmi les invertébrés aquatiques et certains poissons ont généralement été signalés à des doses considérablement plus élevées que celles prescrites sur les étiquettes des produits (Glare et O'Callaghan, 1999). Plusieurs de ces études ont été faites en laboratoire.

Le méthoprène s'est révélé modérément toxique pour certaines espèces de poissons à des concentrations variant de 3,3 à 100 mg/l. Toutefois, une toxicité aigüe est peu probable en raison des faibles concentrations de méthoprène qui seraient générées dans les conditions normales de traitement pour le contrôle des larves (Glare et O'Callaghan, 1999). L'EPA considère pour sa part comme minime les risques aigus et chroniques pour les invertébrés et les poissons d'eau douce ainsi que les espèces estuariennes exposées au méthoprène lorsqu'il est utilisé dans la lutte contre les moustiques. Les taux de libération de méthoprène provenant de diverses formulations, généré en laboratoire et dans des conditions naturelles, indiquent un maximum de 4 µg/l (Glare et O'Callaghan, 1999). Par conséquent, une exposition au méthoprène n'atteindra pas des niveaux qui sont toxiques pour les organismes aquatiques non ciblés après une exposition aigüe ou chronique, sa dégradation dans l'eau étant rapide sous l'effet des rayons ultraviolets.

Par ailleurs, une étude a rapporté un lien possible entre l'utilisation de méthoprène et la présence de difformités parmi les amphibiens (La Clair *et al*., 1998). Toutefois, d'autres auteurs n'ont pas pu observer de malformations, soit dans l'œuf, la larve, le têtard ou la grenouille adulte, à des taux qui sont jusqu'à 500 fois plus élevés que ceux usuellement recommandés pour une application de méthoprène. De plus, ils considèrent comme peu probable le fait que le *S*-méthoprène ou ses produits de dégradation aient pu causer des malformations parmi les amphibiens (Henrick *et al*., 2002; Glare et O'Callaghan, 1999).

Des études ont révélé que le méthoprène pouvait avoir une toxicité non létale chez les oiseaux aquatiques exposés à des fortes doses. Les poulets, le Colin de Virginie et le Canard colvert ont pour leur part démontré une forte tolérance au méthoprène lors d'études alimentaires. De plus, aucun effet n'a été observé sur la reproduction du Colin de Virginie et du Canard colvert nourris à des taux constants de 30 mg/kg d'Altosid® dans la nourriture (United States Environmental Protection Agency, 2001; Glare et O'Callaghan, 1999). Il est par ailleurs peu probable de trouver des taux équivalents dans les plans d'eau traités avec du méthoprène (Glare et O'Callaghan, 1999). Les applications de méthoprène ne semblent pas avoir affecté les populations d'oiseaux à la suite des applications du larvicide (Fuligni, 2001; Glare et O'Callaghan, 1999; Hanoski *et al*., 1997a; Hanoski *et al.*, 1997b).

Selon les travaux effectués par la SOPFIM afin de déterminer la persistance du méthoprène, les résultats obtenus sur une période de 30 jours indiquaient qu'il n'était plus détectable ou alors présent en infime quantité (< 0,15 µg/L) après une dizaine de jours. Sur le terrain, la dégradation du méthoprène dans les puisards semble comparable (Société de protection des forêts contre les insectes et maladies, 2003).

Dans le cadre du suivi environnemental du méthoprène effectué en 2003, 2004 et 2005 au Québec, des échantillons d'eau ont été prélevés dans différents émissaires répartis dans des secteurs d'intervention afin de vérifier le rejet de méthoprène dans l'environnement à la suite des traitements réalisés dans les puisards. En 2003, pour la majorité des échantillons prélevés, le méthoprène n'a pas été détecté (< 0,05 µg/L) (Société de protection des forêts contre les insectes et maladies, 2003). Seulement à deux occasions, des concentrations de 0,32 µg/L et 0,13 µg/L ont été décelées sur un total de 41 échantillons. En 2004, 22 % des 206 échantillons prélevés présentaient des concentrations variant entre 0,01 µg/L et 2,9 µg/L. Dans tous les autres échantillons, le métrophène n'a pas été détecté (< 0,01 µg/L) (Société de protection des forêts contre les insectes et maladies, 2004). Les résultats obtenus en 2005 indiquaient que dans 80 % des échantillons, le méthoprène n'a pas été détecté (< 0,01 µg/L) et que des concentrations variant entre 0,01 µg/L et 1,60 µg/L ont été décelées dans 20 % des échantillons sur un total de 70 échantillons (Société de protection des forêts contre les insectes et maladies, 2005f).

5.2.5 Effets sur la santé

Les données produites lors d'études expérimentales avec des animaux de laboratoire démontrent que le larvicide possède une faible toxicité aigüe pour toutes les voies d'exposition (Glare et O'Callaghan, 1999). Il n'existe pas de données spécifiques de l'exposition humaine au méthoprène. Toutefois, l'ensemble des données disponibles laisse supposer un risque très faible. Aucun signe d'intoxication évident n'a été rapporté lors d'incidents mettant en cause une exposition accidentelle chez l'être humain (Glare et O'Callaghan, 1999). De plus, des tests de sensibilisation effectués auprès de volontaires, selon la méthode normalisée de Draize, se sont révélés négatifs (Glare et O'Callaghan, 1999). Le méthoprène ne semblerait pas avoir d'effet sur la reproduction, ni d'effet mutagène, cancérigène ou tératogène. Les seuls effets génétiques notables ont été

observés sur l'ADN de cellules ovariennes d'insectes, qui sont les organismes cibles du méthoprène.

Les différentes études menées jusqu'à maintenant semblent s'entendre sur le peu de risques que représente le méthoprène s'il est utilisé aux doses prescrites pour le traitement des larves de moustiques. Lorsqu' utilisé selon les recommandations du fabricant, le méthoprène représenterait apparemment un larvicide sécuritaire pour la santé humaine et les autres mammifères.

5.3 *BACILLUS SPHAERICUS*

Le *Bacillus sphaericus* (*Bsph*) est une bactérie aérobie obligatoire qui, comme les autres bacilles, est caractérisée par une forme en bâtonnet. À l'instar du *Bt,* cette bactérie est présente dans le sol à l'état naturel (Zahiri *et al*., 2002). Le grand intérêt que représente cette bactérie dans la lutte vectorielle réside dans l'effet insecticide que certaines souches produisent contre les larves de moustiques par le biais d'un biopesticide produit lors de la sporulation. Sur les quelques 300 souches différentes de *Bsph* identifiées à ce jour, dix-sept auraient des propriétés entomopathogènes (Zahiri *et al.*, 2002). En raison de leur efficacité contre les larves de moustiques (en particulier celles de genre *Culex*) et de leur grande innocuité sur l'environnement et la santé humaine, certaines souches du *Bsph* sont utilisées comme larvicide ailleurs dans le monde depuis de nombreuses années. C'est notamment le cas en Europe depuis 1989 et aux États-Unis depuis 1996 (Mulla *et al.*, 2003). La souche 2362 est actuellement la plus utilisée en raison de sa grande efficacité contre le *Cx quinquefasciatus* (Silva-Filha *et al*., 2001), un moustique qui fait des ravages dans la pays tropicaux en raison de son abondance et de sa distribution importante ainsi que de son rôle comme vecteur pour de nombreuses maladies (principal vecteur de la filariose lymphatique, ce moustique peut également transmettre certaines maladies à arbovirus). Le *Bsph*, souche 2362, a été homologué de façon temporaire au Canada au printemps 2005 pour être utilisé pour la lutte contre les larves de moustiques dans divers habitats aquatiques à usage non alimentaire, tels que marais d'eau douce, plaines inondables, étangs, effluents d'eaux usées, égouts pluviaux et fossés d'irrigation à ciel ouvert, etc. (Agence de réglementation de la lutte antiparasitaire, 2006).

5.3.1 Mode d'action

Comme c'est le cas pour le *Bti*, l'effet larvicide du *Bsph* est produit par les toxines protéiques libérées lors de sa sporulation et qui agissent au niveau du système digestif des larves de moustiques. À la différence du *Bti,* dont la sporulation produit quatre protéines cristallisées différentes (quatre toxines), le *Bsph* n'en produit que deux qui agissent de façon synergique. La toxine binaire résultant de cette association est donc composée de deux chaînes polypeptidiques BinA et BinB (de Oliveira *et al*., 2003; Charles et Nielsen-LeRoux, 2000). Contrairement au *Bti*, les protéines cristallisées produites par le *Bsph* sont encapsulées avec la spore bactérienne ce qui, comme décrit à la section 5.3.2, a une implication sur l'efficacité du produit. L'action combinée de BinA et BinB se produit suite à l'ingestion de spores de la bactérie par une larve de moustique au moment de l'alimentation. Le *Bsph* agit donc contre

les larves qui s'alimentent seulement; il n'affecte ni les nymphes, ni les moustiques adultes. Les toxines se fixent ensuite sur des récepteurs spécifiques de l'épithélium du système digestif de la larve ce qui provoque la lyse des cellules. La paroi intestinale s'en trouve alors perforée en de nombreux endroits ce qui a notamment comme effet de neutraliser le pH de l'intestin de la larve. Cela l'empêche donc de digérer convenablement sa nourriture causant éventuellement sa mort. Des signes d'intoxication sont habituellement visibles chez les larves 30 à 60 minutes après l'ingestion et la mort survient généralement après 48 heures (de Oliveira *et al.*, 2003). Les spores de *Bsph* germent dans l'intestin du cadavre de la larve et se multiplient de façon végétative produisant ainsi de nouvelles générations de bactéries. La grande quantité de spores bactériennes formée (entre 10^5-10^6 spores par cadavre chez le *Cx quinquefasciatus* d'après Davidson (1984)) rejoindra éventuellement l'eau libre et sera alors disponible pour infecter d'autres larves. C'est en partie ce phénomène qui explique l'action prolongée de ce larvicide (Mulla *et al*., 1984).

En Amérique du Nord, c'est la compagnie Valent BioScience Corporation qui fabrique les larvicides à base de *Bsph* (souche 2362). Trois produits différents se trouvent sur les marchés américains et canadiens soit le VectoLex® WDG, le VectoLex® WSP et le VectoLex® CG. Le premier a la concentration la plus forte (51,2 %) et se présente sous forme de granule, alors que les deux autres sont beaucoup moins concentrés (7,5 %) et sont disponibles respectivement sous forme de pochette soluble et de granules (Agence de réglementation de la lutte antiparasitaire, 2006; Société de protection des forêts contre les insectes et maladies, 2005d). Les pochettes s'utilisent principalement dans les puisards, alors que les deux autres produits s'utilisent sur une multitude d'autres milieux et peuvent être administrés par voie aérienne. Généralement, le VectoLex® WDG est d'abord solubilisé dans l'eau avant d'être pulvérisé sur la zone à traiter alors que le VectoLex® CG est utilisé tel quel.

5.3.2 Efficacité

Le *Bsph* n'est néfaste que pour les larves de moustiques et a une toxicité plus ou moins importante selon les genres. Les moustiques les plus sensibles au *Bsph* appartiennent au genre *Culex* (Klein *et al*., 2002; Skovmand et Guillet, 2000) qui regroupe les vecteurs du VNO les plus importants au Québec et ailleurs en Amérique du Nord (vecteurs primaires pouvant occasionnellement agir comme vecteurs passerelles). Parmi les groupes de culicidés affectés de façon moins importante par ce larvicide, notons les espèces du genre *Anopheles* et celles du genre *Aedes* (ces moustiques joueraient au Québec, un rôle secondaire dans la transmission du VNO en tant que vecteur passerelle) (Davidson, 1984).

Le principal avantage qu'offre le *Bsph* par rapport au *Bti* réside dans son effet prolongé qui est principalement dû à son mode d'action. Tel que décrit précédemment, une multiplication bactérienne importante prend place à l'intérieur des cadavres de larves tuées par les toxines du bacille. Ces spores rejoignent par la suite l'eau libre et se retrouvent alors disponibles pour infecter d'autres larves qui s'alimenteront. La persistance du *Bsph* est donc beaucoup plus longue lorsqu'il y a un apport de larves fraîches (Mulla *et al*., 1997). De plus, le fait que les protéines cristallisées soient encapsulées avec la spore fait en sorte qu'elles ne se lient

pas avec les particules naturellement présentes dans le milieu et qu'elles restent davantage en suspension. Les protéines cristallisées sont donc plus disponibles pour les larves ce qui contribue aussi à augmenter l'efficacité de ce produit par rapport au *Bti*.

En raison des formulations utilisées, du dosage et des différentes souches utilisées, il est difficile de faire des comparaisons entre différentes études portant sur l'efficacité et la persistance du *Bsph*. Dans leurs expériences comparant l'efficacité de différents larvicides sous forme de granules contre les moustiques du genre *Culex*, Su et Mulla ont démontré un contrôle plus long avec le *Bsph* qu'avec le *Bti* (14 à 20 jours plutôt que 7 à 12 jours) avec une concentration environ cinq fois moins importante (0,05 à 0,10 lb/acre par rapport à 0,27 à 0,53 lb/acre) (Su et Mulla, 1999). Selon les études en laboratoire de Arredondo-Jimenez *et al.*, les effets larvicides du *Bsph* pourraient même se prolonger jusqu'à quatre mois avec une seule application (Arredondo-Jimenez *et al.*, 1990). Lors d'une étude semblable, Ludwig *et al*. sont cependant arrivés à la conclusion que les effets recherchés diminuaient significativement après un mois (Ludwig *et al.*, 1994). Ce groupe scientifique a en effet enregistré une baisse de 11,4 % de l'efficacité des traitements après 30 jours. Aucune diminution significative additionnelle n'a toutefois été enregistrée au cours des trois mois restants à l'étude. Silva-Filha *et al*. ont pour leur part effectué un contrôle adéquat des larves de moustiques sur une période de 26 mois grâce à seulement huit à neuf traitements par année au *Bsph* (Silva-Filha *et al.*, 2001). Quant aux recommandations de la compagnie produisant les larvicides à base de *Bsph*, Valent BioSciences Corporation stipule qu'une application de VectoLex® (à une dose de 5 à 20 kg/ha) permettrait un contrôle efficace des moustiques pour une période de 30 jours. Des traitements plus réguliers pourraient cependant être nécessaires dépendant des espèces visées et des caractéristiques du site à traiter (Dugal, 2006). L'effet prolongé du *Bsph*, qui permet le traitement d'une zone donnée avec des applications espacées dans le temps, risque cependant d'être limité par le développement relativement rapide d'une résistance chez les larves (voir section 5.3.3).

Bien que le *Bsph* apparaisse à première vue comme étant un produit ayant toutes les qualités nécessaire pour en faire le larvicide biologique de choix dans la prévention de la transmission du VNO, des facteurs liés à la formulation employée et aux conditions environnementales doivent être pris en compte pour assurer l'efficacité espérée.

Les tests de Mulla *et al*. portant sur l'efficacité des différents types de formulation ont démontré un effet à plus long terme des produits sous forme de poudre par rapport aux produits liquides (Mulla *et al.*, 1984). À raison d'une dose de 0,2 lbs/ha, les formulations en poudre permettraient en effet, selon les auteurs de l'étude, un traitement d'une durée de sept jours comparativement à quatre jours pour les formulations liquides. Il est à noter que les formulations de *Bsph* utilisées par l'auteur ont été fabriquées par ce dernier et ne sont pas des formulations homologuées. Ses travaux avaient pour but de démontrer l'utilité de l'efficacité du *Bsph*. Les travaux de Lord ont quant à eux permis de mettre en évidence une activité résiduelle plus longue des produits sous forme de granule contre les larves de *Culex* par rapport aux formulations en poudre, peu importe la superficie ou le degré de pollution de l'étendue d'eau traitée (Lord, 1991). De plus, lorsque les deux types de formulations ont été appliqués sur des milieux secs devant éventuellement être inondés, les spores contenus

dans les granules ont mieux résisté au soleil et étaient toujours viables lors de l'inondation contrairement aux spores présentes dans la formulation en poudre.

Parmi les conditions environnementales pouvant influencer l'efficacité du *Bsph*, la présence de nourriture et le stade larvaire sont des facteurs biotiques déterminants. D'après les expériences de Ramoska et Pacey, l'efficacité du *Bsph* serait en effet inversement proportionnel à la quantité de nourriture présente dans le milieu (Ramoska et Pacey, 1979). Cela s'explique par le fait que les larves de moustiques, qui s'alimentent par filtration de l'eau (Davidson, 1984), ingèrent davantage de spores de *Bsph* lorsque ces dernières constituent une proportion plus importante de la nourriture disponible. Il semble également que plus le stade larvaire est avancé, moins important sera l'effet larvicide du *Bsph*. Des expériences ont démontré que l'effet était réduit de deux à cinq fois chez les larves de *Cx pipiens* ayant atteint le quatrième stade de leur développement comparativement à celles au premier stade (Yap, 1987; Davidson, 1984). On ne sait pas toutefois si cette différence est reliée à l'évolution de la taille chez les larves ou à un changement physiologique ou comportemental (Société de protection des forêts contre les insectes et maladies, 2005d).

Plusieurs facteurs abiotiques, comme la température, le rayonnement UV et le ruissellement, modulent également l'efficacité du *Bsph*. Dans le cas de la température, il semble que la chaleur favorise l'effet larvicide. D'après les études de Mittal *et al.* effectuées sur différentes espèces de moustiques au troisième stade larvaire, la concentration de *Bsph* nécessaire pour tuer la moitié des larves (CL_{50}) serait deux à trois fois moins élevée à 31 °C qu'à 21 °C (Mittal *et al*., 1993). Selon les auteurs, ce phénomène serait causé par une augmentation du métabolisme aux températures plus élevées. Un autre facteur influençant l'efficacité du *Bsph* repose sur l'effet néfaste des radiations ultraviolettes (UV) sur la viabilité des spores. Ainsi, les surfaces traitées au *Bsph* qui sont fortement exposées au soleil risquent de bénéficier d'une protection beaucoup plus courte que les milieux ombragés (Silva-Filha *et al.*, 2001; Cokmus *et al*., 2000). Les milieux à l'abri des radiations solaires comme les puisards constitueraient donc des sites de choix pour recourir au *Bsph* (Société de protection des forêts contre les insectes et maladies, 2005d). Les précipitations importantes et le ruissellement qui en découle risque d'entraîner le produit larvicide à l'écart des endroits que l'on désire traiter ou d'en diminuer la concentration ce qui diminuera l'efficacité du traitement. D'après les expériences de Silva-Filha *et al.*, le ruissellement et les radiations UV seraient les deux facteurs environnementaux ayant le plus grand effet sur l'efficacité d'un traitement au *Bsph* (Silva-Filha *et al.*, 2001).

Le fait que l'efficacité du *Bsph* se manifeste tant dans les milieux pollués (Hougard *et al*., 1993) que dans les milieux non pollués (Mulla *et al.*, 1984) constitue un autre avantage de ce larvicide par rapport au *Bti* qui s'avère peu efficace dans les eaux à forte teneur en déchets organiques. Considérant que plusieurs des vecteurs du VNO se reproduisent de façon importante dans les étendues d'eau des milieux urbains qui sont souvent caractérisées par des niveaux de pollution élevés, cette propriété de *Bsph* prend une importance particulière. Ce larvicide biologique pourrait alors être utilisé dans certains milieux urbains très pollués (par exemple, les puisards) où les larves sont actuellement combattues avec du méthoprène, un larvicide chimique.

Floore *et al.* ont étudié l'efficacité du VectoLex® WDG dans différents milieux de la Floride (Floore *et al*., 2002). Lors de cette étude, on a évalué l'efficacité de doses de 0,56 kg/ha et de 1,12 kg/ha dans neuf sites différents. Trois d'entre eux étaient des gites naturels faiblement pollués, trois étaient des étangs de rétention, alors que les trois autres sites étaient des déversoirs de puisards caractérisés par une forte présence de matière organique. Les six derniers sites avaient un indice de pollution intermédiaire. Des moustiques du genre *Culex* et *Anopheles* étaient retrouvés majoritairement dans les sites correspondant à des gites naturels. Le contrôle de ces moustiques s'y est avéré excellent alors que la réduction des larves a rapidement atteint 99 % pour chacune des concentrations testées. Dans les bassins de rétention, les traitements ont été presque aussi efficaces : une efficacité dépassant 97 % y a été maintenue tout au long de l'étude pour les deux dosages considérés. Pour ce qui est des tests d'efficacité dans les déversoirs de puisards, qui étaient caractérisés par une forte présence de larves du genre *Culex* et qui ont subi de fortes pluies durant l'étude (127 mm), le contrôle assuré par une application à raison de 0,56 kg/ha a été moins efficace que dans les autres sites. L'application de 1,12 kg/ha de *Bsph* aura cependant permis un contrôle adéquat. Les résultats de ces tests suggèrent qu'un seul traitement de larvicide à base de *Bsph* permet un contrôle des populations larvaires pour une période d'au moins trois semaines dans chacun des types de gites évalués à condition que la dose soit appropriée. Les résultats laissent également croire qu'une concentration plus importante de *Bsph* pourrait être nécessaire dans les déversoirs de puisards pour assurer un contrôle équivalent aux autres sites. Les fortes pluies auxquels ont été soumis ces gites particuliers au cours de l'étude (en raison de l'ouragan Floyd) ne permettent toutefois pas de confirmer cette hypothèse.

À la suite de l'homologation canadienne du *Bsph* au printemps 2005, la SOPFIM a vérifié l'efficacité de ce larvicide sur le terrain au cours de l'été dans le cadre de ses travaux d'application de larvicides en prévention. Le développement des larves de moustiques et la recolonisation des gites ont donc été suivis régulièrement dans de nombreux puisards traités au *Bsph*. Pour certaines de ces expériences, des comparaisons ont été faites avec ce qui a était observé dans des puisards traités au méthoprène (ce larvicide empêche les larves de passer au stade adulte sans toutefois agir sur le développement larvaire proprement dit contrairement au *Bsph*). D'après les résultats de ces expériences, l'efficacité à long terme du *Bsph* ne semble pas concluante dans les conditions climatiques québécoises (pluies fréquentes en été) (Société de protection des forêts contre les insectes et maladies, 2005f). Les différents suivis assurés sur les puisards n'ont pas démontré d'effet important du *Bsph* sur le taux de recolonisation des puisards ayant subi un traitement. De façon plus inquiétante, le *Bsph* n'aurait pas eu un effet aussi long qu'anticipé sur la capacité des larves du genre *Culex* à passer aux stades de développement avancés (stades 3 et 4) alors que l'efficacité des traitements était très réduite après deux à trois semaines. Le suivi suggère également une sensibilité au *Bsph* moins grande pour *Oc. japonicus* que pour les espèces du genre *Culex*. L'espèce introduite récemment au Québec a en effet recolonisé plus rapidement les sites traités et leurs larves n'ont apparemment pas eu de problèmes à atteindre les stades 3 et 4 même très rapidement après un traitement au *Bsph* (Société de protection des forêts contre les insectes et maladies, 2005f). Bien que ces résultats semblent indiquer une faible efficacité du *Bsph*, il aurait été intéressant de pouvoir faire une

comparaison avec des milieux n'ayant subi aucun traitement et ce, pour chacun des suivis. De plus, l'impact négatif des épisodes de précipitations sur l'efficacité des traitements doit être souligné et des expériences similaires devraient être répétées dans les prochaines années pour mieux cerner l'efficacité du *Bsph* dans les conditions québécoises. Les gites naturels pour lesquels le suivi de 2005 n'a pas été concluant devraient notamment faire l'objet d'expériences additionnelles.

5.3.3 Résistance

Le développement d'une résistance chez les larves de nombreuses espèces de moustiques à la suite d'une utilisation répétée et prolongée de *Bsph* limite toutefois son utilisation dans la lutte vectorielle (Nielsen-LeRoux *et al*., 2002). Le développement de cette résistance est relié au fait qu'un unique récepteur dans le système digestif des larves de moustiques permet l'action toxique des protéines cristallisées libérées lors de la sporulation du *Bsph* (Charles et Nielsen-LeRoux, 2000). Selon Chevillon *et al*., la résistance chez le *Cx pipiens* serait gouvernée par un gène récessif (*sp-1*^{R}) ayant une influence sur l'affinité entre ce récepteur unique et la toxine libérée par le *Bsph* (Chevillon *et al*., 2001). Les allèles responsables de la résistance pourraient être naturellement présents dans de nombreuses populations de moustiques (Wirth *et al*., 2000). Ainsi, une exposition continue à l'agent bactérien favoriserait la survie des individus résistants à la toxine, ce qui modifierait éventuellement le portrait global de la population de moustiques considérée, en termes de vulnérabilité au larvicide.

Les travaux de Mulla *et al*. ont permis de mettre en évidence l'apparition d'une résistance chez *Cx quinquefasciatus* après seulement quatre traitements au *Bsph* (souche 2362) (Mulla *et al.*, 2003). L'expérience a pris fin après le cinquième traitement alors que la résistance des larves au *Bsph* était 125 000 fois plus importante que dans d'autres populations de moustiques sensibles à la bactérie. Toutes les études ne rapportent toutefois pas une perte d'efficacité aussi drastique du *Bsph*. Silva-Filha *et al*., dont les tests se sont étalés sur deux ans, ont noté une augmentation de la résistance d'un facteur 6,6 et 10,3 par rapport aux populations témoins, après 33 et 37 traitements respectivement (Silva-Filha *et al*., 1995). Il importe toutefois de souligner qu'au cours de ces travaux, les gites traités pouvaient régulièrement être colonisés par des moustiques sauvages toujours sensibles au *Bsph.* Ces échanges entre les populations ont donc pu ralentir le développement de la résistance chez les insectes suivis. D'après Mittal, la résistance au *Bsph* chez *Cx quinquefasciatus* augmenterait d'un facteur variant de 10 à 155 après une année, selon des expériences menées en milieu naturel dans différentes régions de l'Inde (Mittal, 2003). En laboratoire, le degré de résistance de cette espèce au *Bsph* pourrait augmenter d'un facteur 100 000 après seulement 5 à 6 générations exposées intensivement au larvicide (Mittal, 2003). Dans un autre ordre d'idées, il est également pertinent de noter le développement d'une résistance croisée entre les différentes souches de *Bsph* d'un même sérotype (Yuan *et al*., 2003). Ainsi, il n'est pas possible d'alterner entre différentes souches dans le but de limiter le développement d'une résistance si ces souches reposent sur les mêmes récepteurs pour exercer leur action toxique.

Étant donné que les toxines du *Bsph* et du *Bti* s'attachent à des récepteurs appartenant à des classes différentes, il n'y a pas de phénomène de résistance croisée entre ces deux bactéries (Yuan *et al.*, 2003; Zahiri *et al.*, 2002). Il serait ainsi possible de conjuguer l'utilisation des deux larvicides, en les mélangeant ou en les alternant, pour prévenir le développement d'une résistance. Bien que les effets à long terme d'une telle procédure ne soient pas encore totalement connus, la plupart des auteurs s'entendent pour dire qu'il s'agit d'une manière efficace pour prévenir l'apparition d'une résistance à la souche 2362 (Mulla *et al.*, 2003; de Oliveira *et al.*, 2003; Yuan *et al.*, 2003; Zahiri *et al.*, 2002). Les méthodes utilisées pour renverser la résistance acquise au *Bsph* sont mieux documentées et font également appel au *Bti.* Zahiri *et al*. ont mesuré la diminution de résistance, chez des populations résistantes au *Bsph*, à la suite d'un traitement au *Bti* étendu sur dix générations (Zahiri *et al.*, 2002). Au terme de ces traitements, la résistance au *Bsph* avait chuté de 58 % pour une CL_{50} et de 55 % pour une CL_{90}. Un traitement subséquent au *Bsph* sur vingt générations a cependant ravivé la résistance de façon importante (augmentant de 38 % pour une CL_{50} et de 45 % pour une CL_{90}). Cette expérience démontre que le niveau de résistance d'une population de moustiques peut fluctuer en fonction de son degré d'exposition au *Bsph* et n'est pas irréversible. Dans un autre volet de leur étude, mais en utilisant toujours une population résistante au *Bsph* au départ, Zahiri *et al*. ont tenté de contrer la résistance en alternant les traitements au *Bsph* et au *Bti* sur trente générations. La résistance a alors chuté de façon significative. Une réduction de 87 % a été notée pour une CL_{50} et de 74 % pour une CL_{90}. La diminution de résistance s'est majoritairement produite au cours des quinze premières générations pour se stabiliser par la suite (Zahiri *et al.*, 2002). Lors d'une expérience similaire, les mêmes auteurs ont voulu mesurer l'impact d'un mélange de *Bsph* et de *Bti* appliqué sur trente générations sur la diminution de la résistance au *Bsph*. Les cinq premières générations ont été traitées avec un mélange contenant deux fois plus de *Bti* que de *Bsph*, alors que les 25 générations suivantes furent traitées à l'aide d'un mélange moitié-moitié. À la fin de ce traitement, des diminutions de résistance de 92 % et de 86 % ont respectivement été notées pour une CL_{50} et pour une CL_{90}. Les résultats de ces différentes expériences donnent une idée des opportunités qu'offre l'utilisation conjuguée des deux bacilles tout en mettant l'emphase sur l'importance d'assurer un suivi du degré de résistance chez les populations larvaires pour s'assurer de recourir à un traitement adéquat en tout temps. Pei *et al*. soulignent par ailleurs l'importance d'éviter une présence continue du *Bsph* dans l'environnement pour limiter l'exposition des larves de moustiques à une pression sélective (Pei *et al*., 2002).

Une autre technique qui pourrait diminuer le problème de résistance au *Bsph* chez les moustiques tout en lui conférant un champ d'action plus large consisterait à manipuler l'ADN du bacille pour y introduire des gènes codant pour d'autres toxines. Servant *et al*. ont fait des expériences comportant l'introduction chez *Bsph* (souche 2297) de gènes codant pour des protéines toxiques provenant de souches de *Bt* (variétés *israelensis* et *jegathesan*) (Servant *et al*., 1999). Des espèces normalement peu sensibles au larvicide ont pu être traitées adéquatement avec du *Bsph* ayant subi une telle transformation et il a été démontré que la résistance chez des populations de *Culex* résistantes a alors diminué.

La résistance au *Bsph* n'a pas été étudiée au Québec d'autant plus qu'il a été homologué que tout récemment. Néanmoins, étant donné les caractéristiques climatiques québécoises, les moustiques ne se reproduisent que pour une période relativement courte ce qui pourrait limiter les usages répétés et prolongés de *Bsph* et ainsi réduire les problèmes reliés à l'apparition d'une résistance.

5.3.4 Effets sur l'environnement

En plus d'être efficace contre les larves de nombreuses espèces de moustiques, le *Bsph* présenterait une innocuité envers les autres composantes de l'écosystème et les humains. Il semble que cette bactérie affecte uniquement les larves de moustiques et qu'aucun effet néfaste ne serait encouru pour la plupart des organismes non ciblés (Agence de réglementation de la lutte antiparasitaire, 2006). Toutefois, contrairement au *Bti*, peu de travaux existent sur l'innocuité du *Bsph* sur la faune non ciblée (Lacey et Merritt, 2003).

Le fait que la toxine binaire produite lors de la sporulation de *Bsph* soit spécifique à un seul récepteur contribue probablement à ce que le nombre d'espèces affectées par cette toxine soit très limité. La présence de cet unique récepteur spécifique à la toxine de *Bsph* est cependant à l'origine du développement rapide de la résistance chez les populations larvaires (Charles et Nielsen-LeRoux, 2000). Des tests tentant d'évaluer la toxicité du *Bsph* sur différents invertébrés aquatiques n'ont pu mettre en lumière d'impact important sur ces derniers. Mulla *et al*. ont exposé à des larvicides à base de *Bsph* de nombreux insectes appartenant aux familles des dysticidés et des hydrophilidés ainsi qu'à l'ordre des odonates sans toutefois observer de baisse dans leurs populations (Mulla *et al.*, 1984). D'autres études soulignent le peu d'effets directs ou indirects de la bactérie envers les espèces non visées, telles les invertébrés benthiques (Lacey et Merritt, 2003). Une étude s'échelonnant sur trois ans (2000-2002) a été conduite au Wisconsin afin d'évaluer les effets du *Bsph* (Vectolex CG) sur des invertébrés vivant dans des milieux humides (Merritt *et al*., 2005). Pour ce faire, des échantillons ont été prélevés sur des sites traités un jour avant le traitement et 72 heures après et comparés à des sites témoins. Les paramètres examinés étaient la richesse taxonomique moyenne, la diversité moyenne, la richesse en diptères autres que les moustiques, l'abondance des diptères autres que les moustiques et les changements dans la chaîne trophique. Après six traitements, aucun effet n'a été observé sur les organismes non ciblés.

Les études présentées dans la cadre de l'homologation du *Bsph* concernant les effets sur l'environnement terrestre semblent montrer qu'il présente une faible toxicité pour les oiseaux. Par ailleurs, des études avec exposition aiguë par voie orale portant sur des doses à risque maximal administrées à des rongeurs n'ont révélé aucun effet nocif important et laissent supposer une infectiosité et une toxicité minimales pour les mammifères sauvages. Les études soumises indiquent également que le *Bsph* est peu toxique pour les abeilles (Agence de réglementation de la lutte antiparasitaire, 2006).

Tout comme pour le méthoprène, un suivi de la présence du *Bsph* dans les émissaires des secteurs traités a été effectué par la SOPFIM au cours de la saison 2005 (Société de

protection des forêts contre les insectes et maladies, 2005f). Sur les 26 échantillons prélevés à cinq stations, 92 % d'entre eux présentaient des concentrations variant entre 0,1 et 28 x 10^4 UFC/L. À titre expérimental, la concentration de *Bsph* a aussi été mesurée dans un puisard traité dans la même journée que son application de manière à quantifier la population de *Bsph* à son niveau le plus élevé. Une valeur de 2,0 x 10^9 spores/L a alors été obtenue. Ceci démontre donc qu'une faible proportion de *Bsph* est détectée aux émissaires.

5.3.5 Effets sur la santé

Une étude financée par l'Organisation mondiale de la Santé (OMS) portant notamment sur les effets d'expositions intraoculaires, intracérébrales, sous-cutanés, orales et intrapéritonéales n'ont démontré aucun effet pathogène du *Bsph* (Siegel et Shadduck, 1990). L'US EPA conclut pour sa part à la sécurité du *Bsph* pour les humains et les autres mammifères compte tenu de sa présence indigène dans l'environnement et de sa faible toxicité envers les mammifères (United States Environmental Protection Agency, 1998a). Cette même agence n'impose d'ailleurs pas de limites quant à la présence de *Bsph* dans les aliments destinés aux humains. Concernant cette même bactérie, la base de données sur les pesticides *PAN Pesticides Database* ne fait quant à elle état d'aucune propriété toxique, cancérigène, mutagène ou d'effet sur la reproduction ou à titre de perturbateur endocrinien (PAN Pesticides Database - Chemicals, 2003).

Selon les renseignements fournis à l'ARLA par le demandeur de l'homologation, aucun des produits de formulation utilisés dans les formulations commerciales homologuées au Canada ne présentent de risque de toxicité (Agence de réglementation de la lutte antiparasitaire, 2006).

5.4 SYNTHÈSE DES LARVICIDES

Parmi les insecticides actuellement homologués au Canada pour le contrôle des larves de moustiques vecteurs, le *Bti et* le *Bsph*, deux larvicides biologiques, et le méthoprène, un larvicide chimique, s'avèrent ceux étant les plus efficaces et présentant la meilleure innocuité.

Le *Bti* est spécifique à l'égard des insectes piqueurs et agit rapidement contre les larves des moustiques ciblés. L'effet larvicide du *Bti* est produit par les toxines protéiques libérées lors de sa sporulation et qui agissent au niveau du système digestif des larves de moustiques. Le *Bti* ne produit aucun résidu toxique et présente un faible risque d'apparition de résistance dans les populations ciblées. Il est sans danger pour les prédateurs, parasites et autres insectes utiles ainsi que pour les organismes aquatiques utiles, y compris la plupart des crustacés, des acariens, des insectes, des amphibiens et des poissons. Il est également sans danger pour les êtres humains et les autres vertébrés. L'activité résiduelle des formulations commerciales est cependant faible et le *Bti* est plus sensible aux conditions environnementales que les produits chimiques. Il est également moins efficace dans les milieux riches en matière organique, tels que les puisards.

Le méthoprène est un produit analogue à une hormone juvénile qui agit de façon non toxique en interrompant le cycle vital de nombreux insectes, dont les moustiques et les mouches noires. Il apparaît comme étant un produit très efficace pour réduire l'émergence de moustiques adultes dans les puisards. Il pourrait toutefois être à l'origine d'apparition de développement d'une résistance chez les moustiques, quoique non démontrée au Québec. Contrairement au *Bti*, le méthoprène est beaucoup moins sélectif et peut affecter directement plusieurs types différents d'insectes et d'invertébrés. Malgré tout, son impact environnemental est restreint en raison de la rapidité avec laquelle il est dégradé. De plus, lorsqu'il est utilisé selon les recommandations du fabricant, le méthoprène ne présente pas de risque sérieux pour la santé humaine.

Le *Bsph*, qui agit de façon semblable au *Bti*, comporte certains avantages par rapport au *Bti* dans la lutte contre les larves de moustiques. Il agit de façon plus spécifique que le *Bti* et son efficacité s'étend généralement sur une plus longue période. Des produits à base de *Bsph* ont effectivement démontrés une grande efficacité envers les larves de *Culex* dans divers habitats. De plus, ce larvicide peut également être utilisé avec succès dans certains milieux à forte teneur en matière organique où le *Bti* jouit d'une efficacité moindre, par exemple dans les puisards. Comme le *Bsph* est très spécifique aux larves de moustiques, aucun effet néfaste n'est encouru pour la plupart des organismes non ciblés. Quelques études ont aussi démontré l'absence d'effets sur la santé humaine et animale du *Bsph*. Le principal désavantage du *Bsph* réside dans la rapidité avec laquelle les larves de moustiques peuvent y développer une résistance. Une utilisation combinée des deux produits pourrait cependant, dans la plupart des situations, permettre un traitement plus adéquat des larves de moustiques vecteurs que ne le permet le *Bti* seul.

Au Québec, les problèmes reliés à l'apparition d'une résistance sont toutefois limités par les conditions climatiques. En effet, les moustiques ne se reproduisent que pour une période relativement courte ce qui évite les usages répétés et prolongés de larvicides, dont le méthoprène et le *Bsph*.

6 TRAITEMENTS AUX ADULTICIDES

La stratégie d'intervention actuelle au Québec se veut graduelle et pondérée en fonction du niveau de risque. Elle prévoit en effet l'épuisement de toutes les possibilités avant que ne soit envisagée l'application de larvicides dans des zones où la présence du VNO s'est intensifiée afin de prévenir l'apparition des moustiques porteurs du virus. Des adulticides ne seraient utilisés qu'en tout dernier recours si la situation atteignait un niveau extrême, difficilement contrôlable en présence de plusieurs cas humains (Gouvernement du Québec, 2005). Jusqu'à maintenant, aucun traitement avec des adulticides, c'est-à-dire des insecticides ayant la capacité de tuer des moustiques adultes, n'a été utilisé sur le territoire québécois en vue de lutter contre le VNO.

De telles mesures ont toutefois été prises dans la ville de New York en réponse aux nombreux cas humains déclarés en 1999. Des applications terrestres et aériennes d'adulticides ont alors été effectuées dans quelques comtés (Miller, 2001). Dans d'autres États américains, les applications d'adulticides font partie intégrante des programmes de contrôle des moustiques depuis plusieurs années. En Floride, par exemple, le malathion, le fenthion, le naled et la resméthrine ont été utilisés pour l'application aérienne et terrestre d'adulticides. En plus de ces produits, la perméthrine, le propoxur et les pyréthrinoïdes de synthèse ont aussi été utilisés lors d'applications terrestres (Floore *et al.*, 2002; Wassmer et Morris, 1998).

Dans le cadre de la lutte contre le VNO au Québec et en tenant compte de la possible nécessité de recourir à des adulticides, il importe néanmoins de dresser un portrait des différents produits disponibles pour mieux connaître leur efficacité de même que leurs impacts potentiels sur la santé et l'environnement.

Tout comme pour les larvicides, les adulticides pouvant être utilisés au Québec dans le contrôle vectoriel afin d'assurer la protection de la population contre le VNO doivent être préalablement homologués par l'ARLA (voir Chaussé *et al*., 2005 pour plus de détails). Les adulticides actuellement homologués au Canada pour la lutte contre les moustiques appartiennent à quatre classes d'insecticides, soit les carbamates, les organochlorés, les organophosphorés et les pyréthrinoïdes. L'application d'adulticides peut s'effectuer à partir du sol (camions, applicateurs) ou par voie aérienne (avions, hélicoptères). Pour des raisons d'efficacité, de coûts et de sécurité, la technique d'application en ultra bas volume (UBV) est celle qui est recommandée et la plus utilisée au Canada (Société de protection des forêts contre les insectes et maladies, 2005a; Insecticide National Steering Evaluation Comittee Team, 2001). L'application UBV est une vaporisation à froid qui consiste à mettre en suspension dans l'air des microgouttelettes d'adulticides afin d'augmenter la probabilité de contact avec les moustiques et la mortalité de ceux-ci. Seulement les adulticides pouvant être appliqués par cette technique par voie terrestre ou aérienne ont donc été retenus en plus du traitement barrière.

Les adulticides homologués pour l'application par voie terrestre contiennent tous du malathion, des pyréthrines synergisées ou de la *d-trans*-alléthrine synergisée. La perméthrine est appliquée quant à elle comme traitement barrière. Deux synergistes, le butoxyde de pipéronyle (PBO*)*, et le N-octyl bicycloheptène dicarboximide (MGK-264) sont également décrits en raison de leur utilisation en combinaison avec les pyréthrines et la *d-trans*-alléthrine pour le PBO, et avec la *d-trans*-alléthrine pour le MGK-264. Pour ce qui est de l'application d'adulticides par voie aérienne, seul le malathion est homologué au Canada. La resméthrine synergisée au PBO a néanmoins été retenue afin de disposer des données requises pour une éventuelle demande d'homologation. La resméthrine fait partie des produits disponibles pour des applications aériennes aux États-Unis et plusieurs experts lui reconnaissent de nombreux avantages.

D'autres insecticides sont homologués au Canada pour le contrôle vectoriel, mais en raison de leur profil toxicologique présentant de nombreux risques pour la santé humaine ainsi que pour l'environnement, ils n'ont pas été retenus dans cette étude. En effet, le propoxur et le dichlorvos sont considérés comme étant très toxiques et potentiellement cancérigènes (Samuel et St-Laurent, 2005).

6.1 MALATHION

Le malathion est un insecticide organophosphoré à large spectre qui a été homologué au Canada en 1953. L'utilisation principale du malathion au Canada est pour la lutte contre les insectes ravageurs en agriculture (Agence de réglementation de la lutte antiparasitaire, 2003a; Agence de réglementation de la lutte antiparasitaire, 2003b). À Winnipeg, il est employé contre les moustiques depuis des décennies dans les zones résidentielles extérieures pour éviter les problèmes de nuisance. Le malathion se présente sous forme liquide, est pratiquement insoluble dans l'eau et est peu volatil. D'aspect brunâtre, il possède une odeur similaire à l'ail et aux mercaptants (Valcke *et al.*, 2005). Les produits contenant du malathion qui sont homologués pour la suppression des moustiques adultes en zones résidentielles sont des formulations liquides utilisées en pulvérisation UBV.

6.1.1 Mode d'action

Le malathion est un insecticide non systémique et un acaracide de contact, d'ingestion et d'inhalation. Il est inhibiteur de l'activité des cholinestérases, enzymes essentielles à la transmission du signal nerveux (Gouvernement du Québec, 2004a). Plus précisément, il empêche la sécrétion de l'enzyme acétylcholinestérase qui est responsable de la dégradation de l'acétylcholine et qui joue donc un rôle clé dans la communication entre les neurones et entre les neurones et les tissus musculaires. Chez les insectes affectés, la capacité à transmettre l'information des nerfs vers les muscles est donc fortement amputée ce qui cause rapidement une paralysie. La mort de l'insecte survient par la suite.

Au Canada, quatre formulations commerciales, ayant comme ingrédient actif le malathion, sont actuellement homologuées contre les moustiques adultes pour une application UBV par voie aérienne ou terrestre.

6.1.2 Efficacité

Il est difficile de comparer les résultats d'étude portant sur l'efficacité du malathion pour réduire les populations de moustiques puisque les paramètres varient (emplacement des zones d'étude, espèces de moustiques ciblées, équipement de pulvérisation utilisé, doses appliquées, etc.). Les quelques études retrouvées dans la littérature portaient de plus sur une espèce de moustique, *Cx tarsalis*, qui ne se rencontre pas au Québec et ayant une biologie différente des principales espèces québécoises vecteurs du VNO (*Cx pipiens et Cx restuans*).

Une étude effectuée en 1967 dans le comté de Hale au Texas a documenté l'efficacité du malathion dans le cadre de la lutte contre l'encéphalite équine de l'Ouest, un arbovirus transmis par les moustiques à l'instar du VNO. Apparemment, une réduction significative du nombre de moustiques de l'espèce *Cx tarsalis* (le principal vecteur dans cette région) n'a été observée que pendant les 48 premières heures suivant les traitements aériens en UBV. Il semble que la migration de moustiques depuis l'extérieur de la zone traitée expliquerait la hausse dans le nombre de moustiques après deux jours (Mitchell *et al*., 1969). Bien qu'aucun cas humain clinique n'ait été rapporté dans le comté de Hale en 1967, un lien direct avec les pulvérisations en UBV de malathion n'a pu être établi. Pour d'autres espèces de moustiques (des genres *Psorophora* et *Aedes*), les populations auraient été réduites de façon significative pour un à deux jours de plus (Mitchell *et al*., 1970). Des résultats similaires ont été enregistrés au Manitoba en 1975, 1977, 1981 et 1982 lors des éclosions d'encéphalite équine de l'Ouest (Brust et Ellis, 1976; Ellis, 1976) [tiré de INSECT, 2001]). Une réduction temporaire (3 à 7 jours) de l'ordre de 80 % des effectifs adultes de *Cx tarsalis* a été estimée.

En ce qui concerne les taux d'infection chez les moustiques pour l'ensemble de la saison, aucune différence significative n'a pu être mise en évidence entre les zones traitées et non traitées. Encore ici, il semble que l'absence de différence significative soit due à l'arrivée de moustiques des zones non traitées situées à proximité. Le recours à des traitements barrière autour des zones traitées au malathion avaient été suggérés pour réduire l'introduction des moustiques dans ces secteurs (Mitchell *et al.*, 1969). Il semble également important de traiter conjointement les sites de reproduction des moustiques avec des larvicides pour éviter une reconstruction rapide de la population de moustiques adultes.

Une récente étude réalisée dans le sud du Manitoba a évalué l'efficacité de l'application par voie terrestre du malathion contre *Cx tarsalis* (Lindsay *et al*., 2005) à la suite d'un traitement à Stony Mountain en 2003 et après deux applications à Deloraine en 2004. L'efficacité de ces traitements était estimée à partir de la mortalité observée dans des cages à moustiques et en comparant les captures de *Cx tarsalis* effectuées dans les pièges *CDC Light Trap* avant l'application. L'abondance de *Cx tarsalis* dans des sites non traités situés à proximité était aussi suivie. Les résultats obtenus révélaient que l'efficacité des applications approchait 50 %, mais que l'effet était passager. Une couverture inadéquate du malathion ou un nombre insuffisant de traitements expliqueraient le niveau de contrôle obtenu. Des zones tampons traitées trop restreintes autour des communautés seraient un autre facteur. Pour améliorer

l'efficacité des traitements contre *Cx tarsalis* dans les communautés rurales, il est suggéré de traiter par voie aérienne des bandes tampons d'une largeur d'au moins 4 à 5 km pour éviter la recolonisation par des moustiques environnants (Lindsay *et al.*, 2005).

La température serait aussi un élément à considérer dans l'évaluation de l'efficacité du malathion. Il s'agit en effet d'un produit qui est plus efficace au-dessus de 15 °C (Henderson *et al.*, 1985).

6.1.3 Résistance

La résistance au malathion a été documentée dans des pays situés en Amérique du Sud et en Asie. L'utilisation fréquente et presque continue du malathion dans le cadre de programmes de contrôle d'*Ae. aegypti*, un important vecteur de la dengue, a induit une résistance chez *Cx quinquefasciatus* mais pas chez *Ae. aegypti* (Hemingway et Ranson, 2000). Afin de déterminer l'étendue spatiale de ce problème de résistance, la susceptibilité au malathion de *Cx quinquefasciatus* et *Ae. aegypti* a été évaluée sur des individus provenant de divers pays. Un très grand niveau de résistance a été observé sur des *Cx quinquefasciatus* provenant du Venezuela, de Colombie, du Brésil et de Cuba (Hemingway et Ranson, 2000; Coto *et al*., 2000). À la lumière de ces résultats, le malathion n'est probablement pas efficace pour le contrôle des adultes *Cx quinquefasciatus* en milieu urbain. En conséquence, dans ces pays, les opérations de contrôle doivent faire appel à des insecticides qui ne sont pas des organophosphorés comme les pyréthrinoïdes.

Des tests sur la résistance ont été réalisés, suivant la procédure et la méthode de l'Organisation mondiale de la Santé (OMS), sur des populations de moustiques des comtés de Charleston et Georgetown de la Caroline du Sud aux États-Unis (Mekuria *et al*., 1994). Suivant cette méthode, *Ae. taeniorhynchus* a été trouvée résistante au malathion (mortalité variant entre 1,0 à 54,4 %) Dans un moindre degré, *Ae. sollicitans* et *Cx nigripalpus* ont été trouvées résistantes au malathion (mortalité respective de 72,1 à 81,0 % et de 46,2 %). L'espèce *Ae vexans* s'est révélée être très susceptible au malathion (mortalité de 98,6 %). Dans le cadre de pulvérisations UBV de malathion effectuées sur le terrain, de faibles taux de mortalité ont été obtenus sur les moustiques *Ae. aegypti* et *Ae. taeniorhynchus* (Mekuria *et al.*, 1994).

Des chercheurs du *Texas Agricultural Experiment Station*, du *Texas Cooperative Extension* et du *Mosquito Control Division of the Harris County Public Health and Environmental Services Department* aux États-Unis, collaboreraient ensemble pour étudier la résistance au malathion et d'autres insecticides en vue de mieux pouvoir prévenir ce type de problème dans le cadre d'un programme de prévention et de contrôle du VNO (Chenault, 2004).

Au Québec, comme les adulticides ne sont ni largement ni couramment utilisés, ceci minimiserait l'apparition d'une éventuelle résistance.

6.1.4 Effets sur l'environnement

Le malathion est peu persistant et se dégrade rapidement dans l'environnement. Sa demi-vie dans le sol est inférieure à un jour, tandis que sa demi-vie dans l'eau varie de 0,5 à 19 jours (Agence de réglementation de la lutte antiparasitaire, 2003b). Par ailleurs, il ne semble pas être sujet à la bioaccumulation (US EPA, 2000b [tiré de Samuel et St-Laurent, 2005]). Néanmoins, des effets néfastes reliés à son utilisation peuvent être encourus sur certains organismes vivants.

Le malathion est notamment reconnu pour être très toxique pour les poissons et les invertébrés aquatiques ainsi que pour plusieurs insectes dont les abeilles (US EPA, 2000b [tiré de Samuel et St-Laurent, 2005]). Il faut donc éviter toute application de cet adulticide près des milieux aquatiques ou des ruchers. Même si le malathion s'avère toxique pour ces espèces, l'effet éventuel sur les abeilles et autres insectes utiles qui peuvent se trouver dans les zones traitées est toutefois minimisé car les applications auraient lieu la nuit, au moment où les abeilles ne sont pas actives. Pour les autres espèces qui seraient actives pendant les périodes de pulvérisation, les effets sur ces populations ne seraient permanents en considérant le rétablissement des colonies en provenance des zones non traitées à proximité (Agence de réglementation de la lutte antiparasitaire, 2003b). La méthode d'application avec la technique UBV limite également les effets sur les organismes aquatiques. Les très fines gouttelettes émises peuvent s'évaporer lorsqu'elles sont en suspension, c'est pourquoi elles ne se déposent pas ce qui restreint l'exposition (Agence de réglementation de la lutte antiparasitaire, 2003b).

L'ARLA a déterminé que la toxicité du malathion envers les oiseaux et les mammifères est faible (Agence de réglementation de la lutte antiparasitaire, 2003b). Les pesticides organophosphorés sont considérablement moins toxiques pour les mammifères que pour les insectes. Contrairement aux insectes, les mammifères sont capables de dégrader le malathion en composés qui n'empêche pas la sécrétion de l'acétylcholinestérase. Ils possèdent en effet des enzymes spécifiques se trouvant principalement au niveau du foie mais aussi d'autres tissus qui dégradent rapidement et annulent l'effet toxique du malathion et des autres organophosphorés. Ce processus minimise les effets néfastes de ces produits (Murphy, 1986). Cependant, une exposition excessive au malathion pourrait nuire à ce processus unique aux mammifères et donc bloquer la sécrétion de l'acétylcholinestérase.

6.1.5 Effets sur la santé

Le malathion est reconnu pour avoir une toxicité aigüe relativement faible lorsque comparé avec d'autres insecticides de la même famille. Il n'a d'ailleurs qu'un léger potentiel irritant pour la peau ou les yeux (Liggett et Parcell, 1985a et b ; Kynoch et Smith, 1986 [tirée de Samuel et St-Laurent, 2005]). La toxicité plus importante mise en évidence par des études antérieures serait plutôt causée par la présence d'impuretés dans le produit. Il est également à noter que la malaoxon, un important métabolite du malathion, est de 10 à 30 fois plus toxique que la malathion lui-même (IPCS, 1998 [tiré de Samuel et St-Laurent, 2005]). Il est

estimé que 4 à 5 % du malathion adsorbé se transforme en malaoxon (Samuel et St-Laurent, 2005).

Lors d'expériences effectuées sur des rats et portant sur la toxicité subchronique du malathion par voie orale, il a été démontré que cet insecticide pouvait être à l'origine d'une augmentation de volume du foie et des reins ainsi que d'une réduction de la quantité d'hémoglobine contenue dans les globules rouges. Aux doses les plus importantes, une baisse de l'activité des cholinestérases du cerveau a également été notée (Daly, 1993a et b [tiré de Samuel et St-Laurent, 2005]). Pour ce qui est de la toxicité par voie respiratoire, les rats exposés de façon régulière à du malathion ont présenté certains symptômes tels une coloration de la région urogénitale, une salivation plus abondante que la normale et un manque d'entretien du pelage (Beattie, 1994 [tiré de Samuel et St-Laurent, 2005]). La même expérience a également mis en évidence l'apparition de lésions au niveau du système respiratoire ainsi qu'une réduction de l'activité des cholinestérases. Les expositions cutanées entraînent par ailleurs moins de conséquences négatives sur les animaux testés. En effet, selon l'étude de Moreno, ce type d'exposition n'induirait aucune conséquence, si ce n'est une baisse dans l'activité des cholinestérases (Moreno, 1989 [tiré de Samuel et St-Laurent, 2005]).

En ce qui concerne la toxicité chronique, le malathion constitue un produit plus préoccupant. Selon une étude réalisée par Daly sur des rats de laboratoire, l'ingestion chronique de malathion est à l'origine de nombreux effets, notamment une hausse de poids du foie, des reins, de la thyroïde et de la parathyroïde, une augmentation de la consommation de nourriture, une hyperplasie de l'épithélium olfactif, une baisse de l'activité des cholinestérases du cerveau et des modifications dans les paramètres hématologiques (Daly, 1996 [tiré de Samuel et St-Laurent, 2005]). Aux doses les plus élevées, les femelles à l'étude ont également présentée un taux anormalement élevé de tumeur au foie. Une étude similaire portant cette fois sur des souris a également mis en évidence une cancérogénécité du malathion aux doses les plus élevées tant chez les mâles que les femelles en plus de nombreux autres effets semblables à ceux énumérés ci-haut (Slauter, 1994 [tiré de Samuel et St-Laurent, 2005]). Selon le *Cancer Assessment Review Committee* (CARC), le malathion est classé comme un produit démontrant une évidence suggestive de cancérogénécité, celle-ci n'ayant cependant pas pu être évaluée chez l'humain (US EPA, 2000a, 2000b et 2000c [tiré de Samuel et St-Laurent, 2005]).

Des études ont également démontré que le malathion pouvait occasionner des complications lors du développement fœtal. À cet effet, il a été démontré que le malathion pouvait être à l'origine d'une augmentation de l'incidence des œufs fécondés non implantés chez les lapins (Siglin, 1985 [tiré de Samuel et St-Laurent, 2005]). Le malathion peut également avoir un pouvoir neurotoxique chez le rat (US EPA, 2000b [tiré de Samuel et St-Laurent, 2005]). De plus, bien que le malathion ne semble pas posséder de pouvoir mutagène, le malaoxon, son métabolite principal, peut provoquer des mutations géniques (US EPA, 2000c [tiré de Samuel et St-Laurent, 2005]).

Bien que la toxicité du malathion soit moindre que celle de la majorité des organophosphorés, cet insecticide peut avoir des effets toxiques non négligeables chez l'humain. L'impact sur la santé humaine varie cependant beaucoup selon le degré d'exposition (dose, fréquence, durée de l'exposition, etc.). Les effets les plus sévères surviennent uniquement à des niveaux d'exposition élevés qui ne devraient normalement pas être atteints lors de pulvérisations aériennes visant le contrôle des moustiques. De nombreux cas d'intoxication à cet insecticide ont été notés par le passé. Aux États-Unis, plus de 10 000 cas d'incidents liés à des expositions au malathion ont été compilés à ce jour (Samuel et St-Laurent, 2005) dont près du tiers concernent des enfants ce qui souligne la vulnérabilité particulière de ce groupe d'âge dont les habitudes de vie les exposent probablement davantage au produit. Il est à noter que la grande majorité des incidents sont reliée à des expositions non-professionnelles. Les causes d'intoxication les plus fréquentes sont attribuées à des emballages endommagés, les cas s'expliquant par des applications d'insecticide arrivant au deuxième rang. À titre d'exemple, une région de la Floride ayant fait l'objet de traitements au malathion dans la lutte contre un insecte nuisible a connu des problèmes d'intoxications humaines suite aux pulvérisations en 1998. Sur les 132 000 habitants de la région, 123 cas d'intoxication furent rapportés dont 34 sont considérés comme probables et 89 comme possibles (US EPA, 2000b [tiré de Samuel et St-Laurent, 2005]). Lors d'autres utilisations de malathion aux États-Unis, les symptômes rapportés par les personnes intoxiqués sont généralement peu sévères. Ils incluent des maux de tête, des nausées ainsi que des problèmes respiratoires (US EPA, 1998d [tiré de Samuel et St-Laurent, 2005]). Bien qu'une majorité de gens ne semble pas incommodée par les pulvérisations de malathion et que les symptômes rapportés chez les personnes intoxiquées soient généralement mineurs, une attention particulière devrait être accordée aux groupes plus à risque tels les enfants (en raison de leur degré d'exposition potentiellement plus important), les personnes âgées ou les personnes allergiques (en raison de leur sensibilité).

Étant donné la récente réévaluation du malathion et les mesures normalement prises pour minimiser l'exposition, l'ARLA conclut que le malathion appliqué à ultra bas volume est une pratique sécuritaire pour la lutte contre les moustiques adultes nuisibles ou qui sont une menace pour la santé publique (Agence de réglementation de la lutte antiparasitaire, 2003a; Agence de réglementation de la lutte antiparasitaire, 2003b).

6.2 PYRÉTHRINES

Les pyréthrines sont des insecticides naturels extraits des fleurs de chrysanthème avant d'être purifiés. Ces produits appartiennent à la même famille que les pyréthrinoïdes synthétiques et présentent une toxicité légèrement plus importante que celles-ci. Les pyréthrines sont cependant plus dispendieuses et plus difficiles à produire que les pyréthrinoïdes synthétiques ou que les organophosphorés. Les pyréthrines sont souvent utilisées dans les produits insecticides à usage domestique (voir section 2.2).

L'extrait de pyréthrine généralement utilisé dans les formulations commerciales est composé d'un mélange de six esters différents dont trois proviennent de l'acide chrysanthémique et trois de l'acide pyréthrine.

6.2.1 Mode d'action

Les pyréthrines naturelles se comportent de façon analogue aux pyréthrinoïdes synthétiques en agissant sur les canaux à sodium des cellules nerveuses des insectes. L'ouverture prolongée des canaux qui s'ensuit paralyse les insectes et provoque éventuellement leur mort.

Quatre formulations commerciales ayant comme ingrédient actif les pyréthrines sont actuellement homologuées au Canada pour le contrôle des moustiques en application UBV par voie terrestre. Les pyréthrines seront officiellement réévaluées au Canada par l'ARLA au cours des prochaines années (Bouziani, 2004).

6.2.2 Efficacité

De manière à augmenter l'efficacité des pyréthrines, elles sont souvent utilisées conjointement avec des produits synergistes, dont le PBO, destiné à les rendre plus stables et à empêcher la détoxification chez l'insecte (Samuel et St-Laurent, 2005). Aucune étude portant spécifiquement sur l'efficacité des pyréthrines en application UBV par voie terrestre pour contrôler les populations de moustiques adultes n'a été trouvée dans la littérature consultée.

6.2.3 Résistance

Aucune étude portant spécifiquement sur la résistance résultant de traitements aux pyréthrines en application UBV pour contrôler les populations de moustiques adultes n'a été trouvée dans la littérature consultée.

Des problèmes de résistance aux insecticides appartenant à la classe des pyréthrinoïdes n'ont pas encore été rapportés pour les vecteurs du VNO en Amérique du Nord. Cependant, le développement d'une résistance a déjà été observé chez les moustiques vecteurs de la malaria, principalement les Anophèles, en Afrique de l'Ouest et en Afrique de l'Est, du Kenya à la Tanzanie. D'autre part, des problèmes de résistance sont apparus moins de trois ans après que l'Afrique du Sud ait adopté l'utilisation des pyréthrinoïdes (Kristan *et al*., 2003; Chandre *et al*., 1999), ce qui témoigne de la vitesse à laquelle peut se développer une résistance chez certaines espèces de moustiques. Des traitements fréquents et étendus pourraient aussi avoir précipité l'apparition de cette résistance.

6.2.4 Effets sur l'environnement

Les pyréthrines ont une demi-vie dans le sol de 12 jours (National Pesticide Telecommunications Network, 1998). Elles se caractérisent par une très faible mobilité dans le sol en raison de leur coefficient d'absorption au carbone organique très élevé (Hasardous Substances Data Bank (HSDB), 2001b). Cette propriété réduit les risques de contamination des nappes phréatiques. Comme les pyréthrines sont instables à la lumière et dans l'air, elles sont donc dégradées très rapidement au soleil, à la surface du sol et dans l'eau (National Pesticide Telecommunications Network, 1998).

Les pyréthrines sont très toxiques pour les poissons, les têtards, les insectes utiles, tels que les abeilles, et plusieurs invertébrés aquatiques (National Pesticide Telecommunications Network, 1998). Elles sont légèrement toxiques pour les oiseaux. Même si les pyréthrines sont très solubles dans les graisses, elles se dégradent rapidement et n'ont pas tendance à se bioaccumuler (Extoxnet, 1994).

Des chercheurs de l'université de Californie à Davis ont évalué, entre autres, les effets de pulvérisations UBV de pyréthrines synergisées avec du PBO sur les macro-invertébrés, sur des stades immatures et matures de moustiques sentinelles ainsi que sur des poissons prédateurs de larves de moustiques (Jensen *et al*., 1999). Les expériences ont eu cours en 1996 et la pyréthrine a été appliquée durant trois saisons. Pour chacun des sites, il y avait trois milieux humides agissant comme contrôle. L'abondance et la biomasse de la faune macro-invertébré ont été mesurées avant et après les applications, alors que la survie des larves de moustiques (*Cx tarsalis* et *Ae. melanimon*) et celle des poissons prédateurs dans des cages et agissant comme sentinelles a été comparée avant et après les applications. Les résultats n'ont montré aucune réduction de l'abondance ou de la biomasse des macro-invertébrés dans les sites traités. L'abondance des insectes volants a diminué après l'application d'insecticides dans les sites traités et les sites de contrôle, mais augmentait de nouveau 48 heures suivant l'application des produits. Les larves de moustiques ont montré des taux de survie importants dans tous les sites. Tous les poissons prédateurs ont survécu. Selon cette recherche, il semble que l'application terrestre par ULV des produits utilisés n'a pas d'effets substantiels sur les insectes ou les poissons dans les milieux humides étudiés en Californie.

6.2.5 Effets sur la santé

La toxicité aigüe de la pyréthrine est considérée comme étant peu élevée tant par ingestion que par inhalation. Tout comme il a été observé pour de nombreux pyréthrinoïdes de synthèse, les pyréthrines peuvent toutefois provoquer des tremblements chez les animaux de laboratoire exposés à des doses importantes. Les conséquences d'une exposition par voie cutanée sont minimes (Samuel et St-Laurent, 2005).

La toxicité subchronique des pyréthrines a été évaluée par plusieurs études portant sur des animaux de laboratoire. Il semble qu'elle soit responsable de certains effets systémiques comparables à ceux présentés dans les sections précédentes concernant les pyréthrinoïdes de synthèse. Ainsi, un gain dans la masse hépathique jumelé à une perte de poids corporel a été rapporté par de nombreuses études aux doses les plus élevées de même que l'apparition de tremblements (Samuel et St-Laurent, 2005). Toutefois, dans le cas des pyréthrines, les recherches ont pu mettre en évidence d'autres signes d'intoxication. Ainsi, d'après l'étude de Goldenthal (1988 [tiré de Samuel et St-Laurent, 2005]), les rats ayant survécu à l'ingestion répétée de doses particulièrement élevées de pyréthrine présenteraient un niveau d'activité supérieur à la normale tout en ayant réduit leur consommation de nourriture. Des changements dans les paramètres sanguins de même que des troubles reinaux accompagnés d'une perte de volume des reins auraient aussi été observés. Il a également été démontré que l'inhalation de pyréthrines pouvait entraîner des effets systémiques (tremblements, perturbations sanguines) ainsi que des effets plus localisés au niveau du système respiratoire tel des anomalies au niveau de certaines de ses composantes (larynx, cornets des fosses nasales, nasopharynx et poumons) et une respiration difficile (Newton, 1992 [tiré de Samuel et St-Laurent, 2005]).

Les études étendues sur une plus longue période ont encore une fois démontré des effets des pyréthrines sur le foie ainsi que sur la masse corporelle. Des études suggèrent également un lien entre l'apparition de certains cancers et l'exposition aux pyréthrines (Goldenthal, 1990a et 1990b [tiré de Samuel et St-Laurent, 2005]). L'OMS considère cependant que les résultats démontrant la cancérogénécité des pyréthrines à des doses élevées ne sont guère préoccupants pour les humains compte tenu des faibles doses auxquelles ces derniers risquent d'être exposés advenant d'éventuelles pulvérisations visant le contrôle des moustiques adultes. L'US EPA classe pour sa part les pyréthrines parmi les produits pour lesquels une évidence de cancérogénécité a été démontrée, mais pour lesquels les données sont insuffisantes pour évaluer leur potentiel cancérigène chez l'humain (US EPA, 2004a et 2004b [tiré de Samuel et St-Laurent, 2005]).

Comme cela semble être le cas pour les pyréthrinoïdes synthétiques, les pyréthrines n'ont apparemment pas d'effets notables sur le développement fœtal, mais il semblerait qu'un effet sur la reproduction soit possible. Selon Schardein (1989) [tiré de Samuel et St-Laurent, 2005], les rejetons issus de parents ayant été exposés à des pyréthrines pourraient afficher des poids corporels inférieurs à la normale et s'alimenter moins que les rejetons dont les parents n'ont pas été exposés.

En ce qui concerne les effets possibles sur les humains, les pyréthrines pourraient déclencher des réactions asthmatiques chez les individus déjà sensibles. Deux cas de décès associés à une utilisation domestique de produits contenant des pyréthrines par des asthmatiques ont d'ailleurs été documentés dans le passé (Wagner, 2000 ; Wax et Hoffman, 1994 [tiré de Samuel et St-Laurent, 2005]). Des cas de réactions allergiques sont aussi possibles dans le cas des pyréthrines, en particulier lorsque ces dernières ne sont pas purifiées.

6.3 D-TRANS-ALLÉTHRINE

La *d-trans*-alléthrine est un isomère de l'alléthrine, un insecticide appartenant à la classe des pyréthrinoïdes de synthèse. Les pyréthrinoïdes sont des produits chimiques de synthèse similaires à la pyréthrine. Par rapport aux pyréthrines naturelles, la *d-trans*-alléthrine présente l'avantage d'être plus stable à la chaleur et à la lumière. Il s'agirait de la première molécule appartenant à cette classe à avoir été synthétisée (Samuel et St-Laurent, 2005). Elle se présente comme un liquide jaune ayant une texture visqueuse (International Chemical Safety Cards (ICSC), 2001).

La *d-trans*-alléthrine, appelée aussi bioalléthrine, est souvent utilisée comme moyen de protection personnelle dans des produits appliqués sur la peau ou les vêtements ainsi que dans les spirales insecticides destinées à la combustion (voir section 2.2).

6.3.1 Mode d'action

Comme les autres pyréthrinoïdes, la *d-trans*-alléthrine agit en bloquant les canaux sodiques du système nerveux des insectes (ceux-ci restent alors ouverts plus longtemps) qui l'absorbe par ingestion ou par inhalation. La paralysie conduit ensuite à la mort de l'organisme affecté.

Une seule formulation commerciale ayant comme ingrédient actif la *d-trans*-alléthrine est actuellement homologuée au Canada pour le contrôle des moustiques en application UBV par voie terrestre. Les pyréthrines seront officiellement réévaluées au Canada par l'ARLA au cours des prochaines années (Bouziani, 2004).

6.3.2 Efficacité

De manière à augmenter l'efficacité de la *d-trans*-alléthrine, le PBO et le MGK-264 sont ajoutés à la formulation commerciale. Aucune étude portant spécifiquement sur l'efficacité de la *d-trans*-alléthrine en application UBV pour contrôler les populations de moustiques adultes n'a été trouvée dans la littérature consultée.

6.3.3 Résistance

Aucune étude portant spécifiquement sur la résistance résultant de traitements à la *d-trans*-alléthrine en application UBV pour contrôler les populations de moustiques adultes n'a été trouvée dans la littérature consultée.

6.3.4 Effets sur l'environnement

Comme les autres isomères de l'alléthrine, la *d-trans*-alléthrine possède une mobilité réduite dans le sol ayant peu tendance à se volatiliser une fois appliquée sur le sol ou sur l'eau (Hasardous Substances Data Bank (HSDB), 2001a). De telles caractéristiques devraient être prises en compte lors de l'application du produit de manière à ne pas favoriser une accumulation du produit dans l'environnement lors d'applications répétées en raison des

effets néfastes possibles sur les invertébrés. La *d-trans*-alléthrine est très toxique pour les organismes aquatiques, dont les poissons (International Chemical Safety Cards (ICSC), 2001). Elle est légèrement toxique pour les abeilles (Extoxnet, 1996a).

La *d-trans*-alléthrine n'est apparemment pas sujette à la bioaccumulation et il s'agit d'un produit ne présentant pas de risques importants pour les vertébrés, à l'exception des amphibiens aux stades immatures pour lesquels l'impact n'a pas été documenté (Hasardous Substances Data Bank (HSDB), 2001a). Elle est pratiquement non toxique pour les oiseaux (Extoxnet, 1996a).

6.3.5 Effets sur la santé

La *d-trans*-alléthrine serait somme toute un insecticide assez sécuritaire en ce qui a trait à la santé humaine. Aucune donnée sur des cas d'intoxication humaine n'est d'ailleurs disponible, malgré une utilisation remontant à quelques décennies.

La *d-trans*-alléthrine est considérée comme étant un produit ayant une toxicité aigüe modérée lorsque ingérée. Cet insecticide peut alors notamment être responsable d'étourdissements, de maux de tête, de nausées, d'anorexie et de fatigue. En ce qui concerne son effet lorsqu'elle est appliquée directement sur la peau, des tests sur des lapins suggèrent qu'elle est légèrement irritante sur la peau abrasée lorsque mélangée à du PBO dans des proportions respectives de 4 % et de 20 % (Vercoe et Malone, 1969 [tiré de Samuel et St-Laurent, 2005]). Son effet sur la peau intacte serait par ailleurs très discret.

Des études portant sur de plus longues périodes ont démontré qu'à des doses importantes, des animaux de laboratoire dont la nourriture avait été enrichie de *d-trans*-alléthrine ont présenté certains effets systémiques. Un ralentissement du gain de poids corporel ainsi que des problèmes hépatiques auraient été notés chez des rats (Wallwork *et al.*, 1972 [tiré de Samuel et St-Laurent, 2005]) alors que des chiens auraient été victime de symptômes incluant des tremblements généralisés, un rythme cardiaque irrégulier de même qu'une chute du gain de poids (Griggs *et al.*, 1982 [tiré de Samuel et St-Laurent, 2005]).

Dans les rares études à long terme qui ont été réalisées sur des mélanges de plusieurs isomères de l'alléthrine dont la d-trans-alléthrine, il semblerait que cet insecticide puisse avoir un effet sur la masse de certains organes de même que sur l'activité de certaines enzymes. Aucun effet cancérigène n'a toutefois été mis en évidence. Sato *et al.* (1985 [tiré de Samuel et St-Laurent, 2005]) ont démontré l'effet de la d-alléthrine (mélange de quatre isomères dont la *d-trans*-alléthrine) qui entraînerait une baisse de poids corporel jumelée à une hausse de la masse des reins et du foie chez les rats traités aux plus fortes doses.

6.4 PERMÉTHRINE

Tout comme la *d-trans*-alléthrine, la perméthrine appartient à la classe des pyréthrinoïdes de synthèse. Elle a été développée en 1973 et est la première molécule pyréthrinoïde synthétique qui soit relativement stable lorsque exposée à la lumière du soleil. Ce produit insecticide est à large spectre et est utilisé pour contrôler plusieurs espèces d'insectes sur des cultures de noix, de fruits, de légumes, de céréales, de plantes ornementales ou de champignons. La perméthrine est disponible dans des formulations sous forme de fines particules solides, de concentré émulsifiable, de fumée, de poudre mouillable ou de liquide.

Dans la lutte contre les moustiques adultes la perméthrine peut être utilisée comme traitement barrière. Ce type de traitement consiste à établir un périmètre de sécurité en pulvérisant des adulticides autour d'une zone donnée que l'on désire libre de moustiques. Contrairement aux traitements à ultra bas volume (UBV) qui nécessitent la pulvérisation de microgouttelettes, les traitements barrière doivent se faire en pulvérisant de grosses gouttes qui se déposeront sur un substrat (par exemple, la végétation) (Société de protection des forêts contre les insectes et maladies, 2005b). Les moustiques se dirigeant vers la zone à protéger risquent donc de se poser sur ce substrat traité et mourront à la suite du contact avec la perméthrine. Le traitement barrière a d'abord été utilisé vers le milieu du siècle dernier et a historiquement servi surtout dans la lutte contre différentes maladies transmises par les moustiques en régions tropicales (malaria, dengue, etc.). Les données sur ce type d'intervention dans la lutte contre les moustiques en Amérique du Nord se font cependant rares et les comparaisons avec la situation du Québec s'avèrent, dans ces cas, plus difficiles. De nombreux auteurs considèrent aussi le recours à des filets ou des tissus imprégnés d'insecticides (exemple : moustiquaire autour d'un lit, vêtements, etc.) comme étant une forme de traitement barrière mais il n'est pas question de ce type de protection ici.

Par le passé, un grand nombre de produits ont été utilisés pour les traitements barrière, mais les nouvelles connaissances sur les pesticides ainsi que les normes environnementales de plus en plus sévères restreignent aujourd'hui l'éventail de produits que l'on peut utiliser pour ce genre de traitement si bien qu'au Canada, seuls quelques adulticides sont homologués pour les traitements barrière. La perméthrine semble toutefois être le produit qui convient le mieux à ce type d'application (Société de protection des forêts contre les insectes et maladies, 2005b).

6.4.1 Mode d'action

La perméthrine est un insecticide non systémique de contact et d'ingestion avec un effet répulsif (Gouvernement du Québec, 2004b). Comme c'est le cas pour les autres pyréthrinoïdes, la perméthrine se lie aux canaux sodiques des cellules nerveuses des insectes ce qui a pour effet de prolonger leur ouverture et de paralyser rapidement les insectes affectés pour ensuite provoquer leur mort.

Deux formulations commerciales ayant comme ingrédient actif la perméthrine sont actuellement homologuées au Canada. La perméthrine sera officiellement réévaluée au Canada par l'ARLA au cours des prochaines années. Un des deux produits actuellement homologués a été discontinué en 2003. Ce produit n'est donc plus vendu par le titulaire de l'homologation. Ce qui reste sur le marché peut toutefois être vendu et utilisé jusqu'en septembre 2006 (Bouziani, 2004). L'homologation de l'autre formulation prend fin en décembre 2006.

6.4.2 Efficacité

L'efficacité de la perméthrine a été démontrée contre une grande variété d'insectes nuisibles (Samuel et St-Laurent, 2005). Ce produit est notamment utilisé en agriculture, en milieu résidentiel ainsi qu'en santé publique.

Étant donné sa faible solubilité dans l'eau, mais sa grande solubilité dans les solvants organiques, la perméthrine est très difficile à lessiver (Extoxnet, 1996b). Cette propriété a le double avantage de prolonger l'effet d'un traitement et de minimiser les risques de contamination des nappes d'eau souterraine. La perméthrine est donc majoritairement dégradée par les microorganismes du sol et risque moins d'atteindre les milieux aquatiques où elle a un impact négatif reconnu (Extoxnet, 1996b). De plus, la faible photosensibilité de cette substance (notamment, en comparaison avec d'autres pyréthrinoïdes) lui confère également une activité résiduelle prolongée. Selon Anderson *et al*., la perméthrine utilisée en traitement barrière serait efficace pour une durée de huit jours et l'action toxique du produit serait jumelée à une action répulsive (Anderson *et al*., 1991). Au cours de l'étude de Helson et Surgeoner, qui avait pour but de comparer l'efficacité de plusieurs insecticides pour le traitement barrière sur des terrains résidentiels, la perméthrine s'est illustrée comme étant l'insecticide le plus efficace d'entre eux (Helson et Surgeoner, 1983).

Pour optimiser un traitement barrière, il importe de tenir compte de l'écologie et du comportement de l'espèce de moustique à contrôler ainsi que des caractéristiques du milieu (Société de protection des forêts contre les insectes et maladies, 2005b). De plus, la persistance de l'insecticide sur le substrat traité pourra dépendre de facteurs climatiques ou encore de la nature des surfaces traitées. Ainsi, l'efficacité de la perméthrine diminuerait avec une augmentation de la température (Henderson *et al.*, 1985) et elle n'aura pas la même persistance sur des feuilles, de l'herbe, du bois ou de la brique (Royal, 2004). Par ailleurs, le facteur climatique ayant l'impact le plus important sur la durée d'action de l'insecticide pulvérisé est l'abondance des précipitations (Perich *et al*., 1993). Généralement, il est attendu que l'insecticide pulvérisé soit efficace pour une durée approximative d'une semaine (Florida coordinating council on mosquito control, 1998). La zone à protéger avec le traitement barrière devrait idéalement être entourée d'une ceinture boisée où le produit pourrait être pulvérisé et ne devrait pas abriter elle-même de gites de reproduction de moustiques (Perich *et al.*, 1993). Étant donné que la surface à protéger doit idéalement être bien définie et circonscrite par un périmètre, un traitement barrière à grande échelle est alors difficilement envisageable (Société de protection des forêts contre les insectes et maladies, 2005b). La superficie pouvant être protégée à l'aide de ce genre de traitement devrait donc

idéalement être assez restreinte comme dans le cas d'un terrain privé ou d'un parc municipal.

Quelques études ont mesuré l'efficacité des traitements barrière pour réduire la nuisance occasionnée par les moustiques. Ainsi, Brown *et al.* (2005) ont démontré une baisse significative dans les captures de moustiques (*Ae. vexans* et *Ae. albopictus*) pendant plusieurs semaines suivant un traitement barrière de bifenthrine et de lambda-cyalothrine Ces deux adulticides de la classe des pyréthrinoïdes ne sont toutefois pas homologués au Canada. De leur côté, Perich *et al*. ont également noté une importante réduction de l'abondance des moustiques (*An. albimanus*) dans les villages qui avaient fait l'objet de traitements barrière à l'aide de perméthrine pour le contrôle de la malaria en République Dominicaine (Perich *et al.*, 1993).

En Amérique du Nord, les traitements barrière sont peu utilisés et les données relatant leur efficacité se font donc rares. De plus, il semble qu'aucun suivi de l'efficacité de ces traitements dans le cadre de la lutte contre le VNO n'ait été mené à ce jour (Société de protection des forêts contre les insectes et maladies, 2005b). Il arrive cependant que les traitements barrière soient utilisés dans les programmes de réduction des moustiques de certains États américains ou autres provinces canadiennes. En Pennsylvanie, les traitements barrière sont plus utilisés que les traitements en UBV (R. Ruman, 2005). Le gouvernement mandate des entreprises spécialisées pour qu'elles prennent en charge le traitement de parcs ou de terrains résidentiels. Il semble toutefois que la situation prévalant dans cet État soit quelque peu exceptionnelle. Au Canada, une expérience effectuée par le ministère de la santé de la Saskatchewan en août 2004 a mis en évidence l'efficacité de la perméthrine pour une période d'au moins une semaine (Ellis, 2005). Les principales espèces de moustiques contrôlées étaient alors *Cx tarsalis* et *Ae. vexans*. Cette expérience démontre que le traitement barrière pourrait présenter un potentiel d'utilisation au Canada, mais les coûts importants, l'efficacité limitée et les contraintes opérationnelles associées à ce type de traitement n'en font pas la méthode de choix pour lutter contre les moustiques adultes.

Malgré les quelques études faisant état de l'efficacité du traitement barrière, il est généralement accepté que la pulvérisation d'adulticides à UBV, qui mise sur la brumisation de l'insecticide dans l'air pour tuer les moustiques en vol, est plus efficace pour combattre les moustiques. Lorsque des traitements à l'aide de larvicides s'avèrent insuffisants et que le contrôle des moustiques adultes est considéré, les pulvérisations en UBV sont donc généralement favorisées. Cette méthode est d'ailleurs la plus utilisée contre les moustiques adultes au Canada en raison de ces avantages sur les plans économiques et sécuritaires (Insecticide National Steering Evaluation Comittee Team, 2001). Au New Jersey, on considère qu'une quantité trop importante d'insecticide devrait être appliquée en traitement barrière pour obtenir l'effet désiré ce qui risquerait d'entraîner des effets sur l'environnement et des déboursés considérables. Les traitements barrière n'y sont donc pas recommandés (Enache, 2005).

Contrairement aux traitements en UBV, les traitements barrière seraient aussi efficaces dans les milieux forestiers très denses. Un intervalle de temps plus long pourrait s'écouler entre les traitements (les pulvérisations en UBV doivent être répétées aux 48 heures environ) et les traitements barrière pourraient être effectués à n'importe qu'elle heure du jour ou de la nuit (Michigan Mosquito Control Association, 2002) ce qui est moins contraignant pour les autorités responsables de l'application de l'insecticide (les pulvérisations en UBV doivent absolument être faites aux moments de la journée où les espèces de moustiques à traiter sont actives donc régulièrement en vol, généralement le soir ou la nuit.

6.4.3 Résistance

Tout comme pour les autres pyréthrinoïdes étudiés (pyréthrines et d-trans-alléthrine), aucune étude portant spécifiquement sur la résistance résultant de traitements à la perméthrine pour contrôler les populations de moustiques adultes n'a été trouvée dans la littérature consultée.

6.4.4 Effets sur l'environnement

La perméthrine est peu mobile dans la plupart des sols et y est peu persistante. Sa demi-vie varie de 30 à 38 jours. Elle est fortement adsorbée sur la matière organique. Dans l'eau, la perméthrine est rapidement décomposée par les rayons ultraviolets. Elle peut également se lier à la matière organique des sédiments (Extoxnet, 1996c).

La perméthrine, à l'image de plusieurs pyréthrinoïdes, s'avèrent toxique pour les organismes aquatiques (poissons, amphibiens, crustacés, insectes). La bioaccumulation de la perméthrine est d'ailleurs élevée chez le poisson jours. Ce produit ne doit donc pas être utilisé en milieu aquatique. De plus, il s'agit d'un produit très toxique pour les abeilles. Elle ne serait pas toxique pour les oiseaux (Extoxnet, 1996c).

6.4.5 Effets sur la santé

La perméthrine possède une faible toxicité aigüe chez la plupart des animaux dont les humains mais sa toxicité varie selon le mode d'exposition ou la nature de la substance avec laquelle elle est mélangée. Ainsi, diluée dans des produits favorisant son absorption, la perméthrine peut avoir un effet toxique plus marqué que lorsqu'utilisée seule (Samuel et St-Laurent, 2005). Lors de contacts cutanés, la perméthrine est susceptible de provoquer des sensations de brûlures, de picotements, de démangeaisons et d'engourdissements (Wilks, 2000 [tiré de Samuel et St-Laurent, 2005]). Ces effets ne sont cependant que locaux et passagers et n'entraînent pas de conséquences à long terme. Des doses beaucoup plus importantes sont nécessaires pour provoquer des effets systémiques qui n'ont d'ailleurs pas été observés à ce jour chez l'humain. Lorsqu'administrée par voie orale à des rats, la perméthrine est métabolisée rapidement et elle disparaît presque complètement de l'organisme après seulement quelques jours (IPCS, 2000 [tiré de Samuel et St-Laurent, 2005]).

Les applications d'adulticides à base de perméthrine seraient sécuritaires étant donné la faible exposition dermique à laquelle les humains risquent de faire face et la toxicité réduite de ce produit pour les mammifères. Une étude menée par Knepper *et al.* a porté sur la déposition de deux formulations différentes de perméthrine sur des filtres disposés sur des objets présents dans des parcs récréatifs pour enfants (Knepper *et al*., 2003). L'analyse des papiers filtres a montré que des résidus des deux formulations s'étaient déposé et que les quantités moyennes de produits déposés étaient faibles 15 minutes après les traitements (0,58 ng/cm par papier filtre pour Aqua-Reslin et 1,13 ng/cm par papier filtre pour Biomist) et qu'après 12 heures, ces valeurs moyennes avaient diminuées.

Il a aussi été démontré que la perméthrine pouvait présenter une toxicité subchronique. L'administration répétée de doses par inhalation provoque notamment des effets neurologiques comme des tremblements ou de l'hyperexcitabilité ainsi que d'autres effets cliniques comme des changements de poids corporel (Samuel et St-Laurent, 2005). De tels résultats ont été notés chez de nombreux animaux testés en laboratoire.

En ce qui concerne les effets chroniques de la perméthrine, certaines études tendraient à démontrer une possible cancérogénécité de cet insecticide au niveau du foie et des poumons sur certaines souches de souris. Des études sur des rats n'ont toutefois démontrées aucun effet cancérigène et plus de recherches seraient nécessaires pour mieux comprendre l'apparition de tumeurs chez les souris exposées à ce pyréthrinoïde (IPCS, 2000 [tiré de Samuel et St-Laurent, 2005]). Dans une récente réévaluation, l'US EPA a classé la perméthrine comme étant un cancérigène probable chez l'humain (US EPA, 2005b).

La perméthrine ne présenterait apparemment que très peu de risques pour le développement du fœtus. Par ailleurs, des études portant sur les risques pour la reproduction de la perméthrine ainsi que sur sa mutagénécité concluent à une grande sécurité de cette substance. Bien qu'aucun effet négatif important n'ait été rapporté suite à une exposition humaine malgré une utilisation remontant à plusieurs années, l'OMS considère malgré tout la perméthrine comme appartenant à la catégorie des produits modérément dangereux (catégorie 2) (IPCS, 2000 [tiré de Samuel et St-Laurent, 2005]).

Les travaux de Valcke et Belleville (2002), portant sur l'évaluation des risques toxicologiques associés à l'utilisation d'adulticides dans le cadre d'un programme de lutte vectorielle contre la transmission du VNO, indiquaient aucun indice de risque supérieur à 1 pour la perméthrine (Valcke et Belleville, 2002). Les individus exposés, selon le scénario établi, ne seraient donc pas susceptibles de subir des effets nocifs. Le doute le plus important demeure toutefois pour les éventuels applicateurs de perméthrine pour le traitement barrière. Il appert que leur exposition sera plusieurs fois plus importante que pour les autres travailleurs (Valcke et Belleville, 2002).

6.5 RESMÉTHRINE

La resméthrine est, comme la perméthrine et la *d-trans*-alléthrine, un insecticide appartenant à la classe des pyréthrinoïdes synthétiques. Elle est constituée d'un mélange de quatre isomères. Il s'agit d'une substance non soluble dans l'eau qui se présente sous la forme d'un solide blanchâtre (Extoxnet, 1996b). Comme c'est le cas pour d'autres pyréthrinoïdes ainsi que pour les pyréthrines, la resméthrine est généralement utilisée en combinaison avec des produits procurant un effet synergisant, tel le butoxyde de pipéronyle (PBO), pouvant eux-mêmes être toxiques. La section 6.6 dresse un portrait toxicologique de ces produits synergistes souvent utilisés avec les pyréthrinoïdes et les pyréthrines.

La resméthrine est l'un des premiers insecticides de la classe des pyréthrinoïdes synthétiques à avoir été commercialisé. Elle est utilisée aux États-Unis depuis 1967 (Cox, 2004). La resméthrine est souvent utilisée pour le contrôle des insectes volants et rampants dans les maisons, les serres et les aménagements de plantes intérieures. Elle peut aussi être appliquée sur des textiles, des animaux domestiques, sur des chevaux et des enclos pour chevaux en vue de les protéger contre les moustiques. Dans le cadre de la lutte contre le VNO, ce produit pourrait, à l'instar du malathion qui est actuellement le seul adulticide homologué pour un traitement aérien contre les moustiques adultes, être aussi utilisé par voie aérienne. Cette substance est considérée comme étant sécuritaire dans de nombreux pays et une homologation éventuelle au Canada en ferait un produit à considérer dans la lutte contre les moustiques adultes vecteurs du VNO.

6.5.1 Mode d'action

La resméthrine est un insecticide non systémique de contact. L'action toxique de la resméthrine provient du fait qu'elle bloque les canaux à sodium des cellules nerveuses des insectes. Ainsi, ces canaux restent ouverts plus longtemps qu'ils ne le devraient ce qui provoque un effet paralysant et la mort de l'insecte.

Aucune formulation commerciale à base de resméthrine n'est actuellement homologuée au Canada pour le contrôle des moustiques adultes. Une formulation appliquée par voie terrestre était disponible dans les années passées, mais ce produit n'est plus homologué depuis novembre 2003.

6.5.2 Efficacité

De manière à augmenter l'efficacité de la resméthrine, le PBO est ajouté à la formulation commerciale.

Harris et Kinoshita (1977) ont décrit une augmentation de la toxicité de la resméthrine de l'ordre de 3,2 lorsque la température passait de 32 °C à 15 °C [tiré de Knepper, 1988]. Les travaux de Knepper (1988) ont évalué l'efficacité d'un mélange de malathion et de resméthrine appliqué par voie terrestre sur les populations de moustiques du genre *Culex* (Knepper, 1988) en vue d'une utilisation sous différentes températures . Une réduction de

l'ordre de 91 % en moyenne a été observée chez *Cx pipiens* et *Cx restuans* à la suite de différents traitements effectués à des températures allant de 12 °C à 32 °C.

Dans le cadre d'une évaluation des effets d'une application aérienne UBV de resméthrine sur la structure par âge des populations de *Cx tarsalis* en Californie, Reisen *et al*. (1984) [tiré de INSECT, 2001] ont noté une suppression seulement temporaire des populations adultes. Une réduction du taux minimal d'infection au virus de l'encéphalite équine de l'Ouest des *Cx tarsalis* femelles a aussi été observée dans l'un des secteurs traités à la resméthrine.

6.5.3 Résistance

Les problèmes de résistance associés à l'utilisation de la resméthrine ont été documentés pour la première fois en 1974, seulement quelques années après sa commercialisation. Les premiers cas de résistance ont été observés chez l'aleurode des serres puis chez différentes espèces d'insectes dont la fausse-teigne des crucifères, la mouche domestique et la coquerelle (Cox, 2004). Le développement d'une résistance à la resméthrine et autres pyréthrinoïdes est problématique étant donné que la resméthrine est largement utilisée dans les programmes de contrôle des moustiques. Les premiers cas de résistance de moustiques à la resméthrine ont été observés à Cuba en 1991. Aux États-Unis, les premiers cas de résistance des moustiques à la resméthrine ont été rapportés en 2003 à la suite de travaux effectués en Californie (McAbee *et al*., 2004). D'autres phénomènes de résistance ont par la suite été documentés en Alabama (Liu *et al*., 2004).

Des travaux ont été effectués par le *Central Massachusetts Mosquito Control Project* en 2005 afin d'évaluer une éventuelle résistance à la resméthrine chez les populations de moustiques (Parsley et Deschamps, 2005). Les programmes de contrôle de moustiques adultes font l'usage de la resméthrine de manière ciblée depuis le début des années 90 dans cette région. Pour chacune des quatre villes choisies, cinq sites ont été retenus pour l'étude parmi les sites ayant fait l'objet le plus fréquemment d'une application de resméthrine. La majorité des propriétés à l'étude ont été traitées entre 12 et 25 fois depuis 1998. Les moustiques adultes récoltés dans ces différents sites ont survécu entre 15 et 35 minutes à la suite de leur exposition à la resméthrine alors que 5 minutes ont suffit pour observer l'effet « knock down » chez 96 % des moustiques provenant d'un secteur non traité. Les résultats obtenus semblent donc démontrés, pour le moment, un faible potentiel de résistance. Étant donné que les applications sont limitées et sporadiques, il n'y a pas lieu que ce potentiel augmente et qu'un autre insecticide doive être utilisé (Parsley et Deschamps, 2005).

6.5.4 Effets sur l'environnement

La persistance dans le sol de la resméthrine est de faible à modérée alors qu'elle est davantage persistante dans l'eau où son utilisation doit donc être évitée. La resméthrine est fortement adsorbée au sol ce qui la rend peu mobile et sa présence risque peu d'entraîner une contamination de la nappe phréatique. Sa demi-vie est estimée à 30 jours, mais des écarts importants ont été obtenus dans différentes études (Extoxnet, 1996d). La resméthrine dans l'eau est décomposée par photodégradation et biodégradation. Lorsqu'elle atteint les

cours d'eau, la resméthrine est rapidement adsorbée par les sédiments. Sa demi-vie dans l'eau est de 36,5 jours. Dans l'air, la resméthrine est toutefois très peu persistante (Extoxnet, 1996d).

La bioaccumulation de la resméthrine est possible, notamment chez certaines espèces de poissons ce qui renforce l'importance de limiter l'utilisation de cette substance en milieu aquatique. Les pyréthrinoïdes sont toxiques pour certains poissons puisqu'ils métabolisent difficilement ces produits (Gouvernement du Québec, 2004c; Extoxnet, 1996d). La resméthrine est également très toxique pour les abeilles et peu toxique pour les oiseaux (Extoxnet, 1996d).

6.5.5 Effets sur la santé

D'après les données scientifiques disponibles, la resméthrine ne présenterait qu'une faible toxicité aigüe autant par voie orale que cutanée ou respiratoire (Samuel et St-Laurent, 2005). Lors d'expositions aigües à des doses importantes, certains animaux de laboratoire ont par ailleurs montré des signes d'atteintes neurologiques incluant des tremblements généralisés, une hyperexcitabilité ainsi que des convulsions.

La dose nécessaire pour qu'une toxicité subchronique soit observée chez les animaux de laboratoire est assez élevée. Lors de l'administration à répétition de quantités importantes de resméthrine, des animaux de laboratoire ont parfois présenté des signes d'intoxication, tels la perte de globules rouges et de volume sanguin. Des irritations et de légers changements neuro-comportementaux ont également été observés dans certains cas.

Des études portant sur la toxicité chronique de la resméthrine chez les rats indiquent des effets à long terme sur le foie. Une exposition prolongée à cet adulticide entraîne en effet une hausse du poids de cet organe ainsi que des lésions pathologiques (IRIS, 2004 [tiré de Samuel et St-Laurent, 2005]). Des effets comparables ont aussi été notés sur les chiens. Tout comme dans le cas des expositions de plus courte durée, des effets neurologiques comme des tremblements ont été notés lors d'études sur la toxicité chroniques de la resméthrine. En ce qui concerne la cancérogénécité de la resméthrine, la plupart des études effectuées sur des animaux de laboratoire ne démontrent pas de lien entre l'exposition prolongée à l'insecticide et le développement de tumeurs cancéreuses (Samuel et St-Laurent, 2005).

La resméthrine ne semble pas avoir d'effet tératogène sur le développement fœtal d'animaux de laboratoire. Toutefois, lors du gavage à la resméthrine de femelles gestantes, un retard dans le développement du squelette des fœtus de rats fut observé (IRIS, 2004 [tiré de Samuel et St-Laurent, 2005]). D'après l'étude de Schwartz *et al.* (1979) [tiré de Samuel et St-Laurent, 2005]), il semblerait aussi que la resméthrine comporte des effets sur la reproduction des rats même aux plus faibles doses testées. Les études visant à évaluer le pouvoir mutagène de la resméthrine se sont pour leur part avérées négatives (Samuel et St-Laurent, 2005).

La resméthrine semble démontrer une faible toxicité chez l'être humain et aucun cas d'intoxication n'a été rapporté par l'OMS (IPCS, 1989 et 1992 [tiré de Samuel et St-Laurent, 2005]). Le « Morbidity and Mortality Weekly Report » fait cependant état de trois cas d'intoxication probablement causés par la resméthrine (Centers for Disease Control and Prevention, 2000). Ces cas sont cependant peu documentés et un lien de cause à effet n'a pu être clairement établi.

6.6 SYNERGISTES

Parfois, des produits sont ajoutés au pyréthrinoïdes de synthèse ou aux pyréthrines pour augmenter leur efficacité. Deux des produits les plus souvent employés avec ces insecticides sont présentés ici. Il s'agit du butoxyde de pipéronyle (PBO) et du N-octyl bicycloheptène dicarboximide (MGK-264). Ces produits sont appelés des synergistes et n'ont pas eux-mêmes d'effet insecticide. En augmentant l'efficacité des insecticides auxquels ils sont associés, ils permettent donc de réduire la quantité d'insecticide à utiliser pour obtenir l'effet recherché. Toutefois, ces substances ont elles-mêmes des effets potentiellement toxiques qui doivent également être pris en compte pour être davantage en mesure d'évaluer l'impact potentiel des traitements à l'aide d'adulticides. Cette section dresse un portrait des caractéristiques toxicologiques de ces deux produits.

6.6.1 Butoxyde de pipéronyle

Le butoxyde de pypéronyle, communément appellé PBO, est souvent ajouté aux pyréthrines naturelles ainsi qu'à certaines pyréthrinoïdes, notamment la resméthrine. Ce synergiste est un produit qui inhibe l'action des enzymes détoxifiantes des insectes (cytochrome P-450) et diminue donc la quantité requise de substance active pour obtenir une dose efficace pour créer l'action physiologique recherchée (National Pesticide Telecommunications Network, 1998). Le PBO a cependant un effet inverse chez les mammifères alors qu'il est responsable de l'activation des cytochromes P-450 chez les organismes de ce groupe (Butler *et al.*, 1996 [tiré de Valcke et Belleville, 2002]). Le PBO n'est pas pour autant sans effet néfaste sur la santé et il s'agit d'un produit considéré comme légèrement toxique pouvant entraîner des effets divers dépendamment de la dose et de la période d'exposition.

La toxicité aigüe du PBO est apparemment modérément élevée. Les symptômes observés chez des animaux de laboratoire exposés à des doses variées incluent une perte d'appétit, des irritations oculaires, des vomissements, de la diarrhée, le coma et même la mort (Valcke et Belleville, 2002). Il est cependant peu probable que de tels symptômes surviennent chez des humains ayant été exposés à des petites doses, que ce soit par voie orale ou cutanée.

Lors d'expositions répétées, le PBO pourrait affecter le foie ou les reins, induire des modifications de l'activité de certaines enzymes ainsi qu'être responsable d'une augmentation du cholestérol sérique (IRIS, 1996 [tiré de Valcke et Belleville, 2002]). Les expositions chroniques au PBO pourraient par ailleurs avoir des effets sur le volume et la croissance de certains organes (New York City Department of Health, 2001) de même que sur les fœtus de femelles gestantes. Une baisse du nombre ainsi que du taux de survie des

rejetons associés à une réduction de leur poids moyen à la naissance et à des modifications du développement post-natal ont en effet été observés lors d'expositions chroniques à de fortes doses de PBO (IRIS, 1996 [tiré de Valcke et Belleville, 2002]). Il semblerait également que le PBO puisse être impliqué dans le développement de certains cancers chez les rongeurs (Takahashi *et al,* 1994 et 1997 [tiré de Valcke et Belleville, 2002]). Les mécanismes expliquant l'induction de ces cancers suite à une exposition chronique au PBO ne sont cependant pas bien compris. Le potentiel cancérigène du PBO pour l'humain est donc possible mais plus de recherches sont nécessaires pour éclaircir davantage le sujet.

Concernant les effets du PBO sur l'environnement, notons que ce produit a la capacité de se bioaccumuler dans la chaîne alimentaire (Valcke et Belleville, 2002). De plus, il s'agit d'un produit qui a une mobilité modérée à faible dans le sol alors qu'il n'est pas persistant dans l'air, à l'image des produits de la famille des pyréthrinoïdes et des pyréthrines.

6.6.2 N-octyl bicycloheptène dicarboximide

Le N-octyl bicycloheptène dicarboximide (MGK-264) est parfois utilisé de concert avec le PBO pour augmenter l'efficacité de divers insecticides dont les pyréthrinoïdes et les pyréthrines. Le MGK-264 est utilisé dans un grand nombre de produits mais il n'est pas homologué pour une utilisation sur des surfaces agricoles, ce qui témoigne de sa toxicité potentielle qui est d'ailleurs considéré comme supérieure à celle du PBO.

La toxicité du MGK-264 lors d'expositions isolées peut entraîner chez l'humain des effets systémiques affectant notamment le système nerveux (ex : maux de tête, étourdissements, perte de jugement, coma) (HSDB, 2005, [tiré de St-Laurent et Samuel, 2005]). Les doses nécessaires pour déclencher de tels effets ne devraient cependant pas être approchées lorsque le produit est utilisé en tant que synergiste, avec des insecticides (Klasco, 2005 [tiré de St-Laurent et Samuel, 2005]). Il a également été démontré que le MGK-264 pourrait être à la source d'irritations oculaires et cutanées chez le lapin et il est considéré comme étant peu toxique par inhalation, ne causant qu'une irritation pulmonaire passagère (HSDB, 2005, [tiré de St-Laurent et Samuel, 2005]).

Lors d'une expérience sur des animaux de laboratoire, il a également été démontré que le MGK-264 pouvait, à plus long terme, avoir des effets subchroniques lorsqu'administré par voie orale. Ces effets incluent la perte de poids corporel, une baisse de l'appétit, des tremblements et une respiration difficile (CEPA, 1997 [tiré de St-Laurent et Samuel, 2005]). Une étude portant sur les effets reliés à l'inhalation du MGK-264 a par ailleurs mis en évidence des altérations (métaplasie, hyperplasie, hypertrophie, tissus kératinisés) au niveau de différentes parties du système respiratoire pouvant perdurer longtemps après la fin de l'exposition (selon la dose) chez les rats testés (US EPA, 2004c [tiré de St-Laurent et Samuel, 2005]).

Les expériences portant sur la toxicité chronique du MGK-264 concluent à un effet de ce produit sur le foie où une hypertrophie cellulaire a été observée ainsi que des effets sur les reins aux doses plus importantes. Des altérations cellulaires diverses de même que

l'apparition de certaines tumeurs (notamment au niveau du foie et de la glande thyroïde) ont également été observées (CEPA, 1997 [tiré de St-Laurent et Samuel, 2005]). Le MGK est actuellement considéré par l'US EPA comme un cancérigène possible chez l'humain (US EPA, 2004d) [tiré de St-Laurent et Samuel, 2005]).

Il semblerait aussi que le MGK-264 puisse affecter le développement du fœtus. Des lapines exposées à diverses doses de ce produit durant la gestation ont en effet présenté une incidence anormalement élevée d'avortements spontanés ainsi qu'une réduction de la viabilité de leurs fœtus aux doses les plus élevées (CEPA, 1997 [tiré de St-Laurent et Samuel, 2005]).

6.7 SYNTHÈSE DES ALDULTICIDES

Les traitements avec des adulticides sont utilisés pour tuer les moustiques adultes vecteurs du VNO. Ces derniers sont tués lorsqu'ils entrent en contact avec le produit. L'application d'adulticides peut s'effectuer à partir du sol (camions, applicateurs) ou par voie aérienne (avions, hélicoptères). Parmi les adulticides actuellement homologués au Canada, seul le malathion peut être appliqué par voie aérienne. Ceux homologués pour l'application par voie terrestre contiennent tous du malathion, des pyréthrines synergisées avec du PBO ou de la *d-trans*-alléthrine synergisée au PBO et au MGK-264. La perméthrine est appliquée quant à elle comme traitement barrière. Comme la resméthrine fait partie des produits disponibles pour des applications aériennes aux États-Unis et que plusieurs experts lui reconnaissent de nombreux avantages, elle a aussi été retenue afin de disposer des données requises pour une éventuelle demande d'homologation. Certains de ces adulticides feront l'objet d'une réévaluation par l'ARLA au cours des prochaines années.

Au Canada, peu de provinces canadiennes ont fait usage de ces produits dans le cadre de la lutte contre les moustiques. Au Québec, aucun traitement avec des adulticides n'a été utilisé jusqu'à maintenant en vue de lutter contre le VNO. Peu de données sur l'efficacité et les problèmes de résistance sont donc disponibles et des comparaisons doivent être tirées à partir d'études effectuées sur d'autres espèces de moustiques et d'autres maladies vectorielles présentes aux États-Unis et sur d'autres continents. Néanmoins, plusieurs études ont confirmé l'efficacité des adulticides contre les moustiques adultes. En effet, les traitements avec des adulticides réduiraient de façon significative le nombre de moustiques adultes présents, mais sur une courte période. La migration de moustiques depuis l'extérieur de la zone traitée ferait en sorte que les pulvérisations doivent être répétées fréquemment ce qui ajoute aux coûts de ce type d'opération ainsi qu'aux répercussions sur l'environnement et sur la santé humaine. Des personnes pourraient en effet être exposées à ces produits de différentes façons, soit par inhalation, par exposition cutanée ou par ingestion. La présence de conditions météorologiques peu propices, les limites de l'équipement utilisé, la densité du couvert végétal, le moment où le traitement est effectué et le recours à une technique d'application inadéquate sont autant de facteurs qui peuvent compromettre l'efficacité du traitement. Il a par ailleurs été démontré que l'utilisation répétée d'adulticides pouvait induire une résistance chez différentes espèces de moustiques. Au Québec, comme les adulticides

ne seraient utilisés que de manière exceptionnelle, ceci minimiserait toutefois l'apparition d'une éventuelle résistance.

Les quelques données se rapportant au traitement barrière indiquent qu'il pourrait présenter un potentiel d'utilisation au Canada, mais les coûts importants, l'efficacité limitée et les contraintes opérationnelles associées à ce type de traitement n'en font pas la méthode de choix pour lutter contre les moustiques adultes. Étant donné que la surface à protéger doit idéalement être bien définie et circonscrite par un périmètre, un traitement barrière à grande échelle est alors difficilement envisageable. La superficie pouvant être protégée à l'aide de ce genre de traitement devrait donc idéalement être assez restreinte, comme dans le cas d'un terrain privé ou d'un parc municipal, et être ceinturée de végétation trop dense pour que des traitements UBV y soit efficaces. Il est généralement accepté que la pulvérisation à UBV, qui mise sur la brumisation de l'insecticide dans l'air pour tuer les moustiques en vol, est plus efficace pour combattre les moustiques. Lorsque des traitements à l'aide de larvicides s'avèrent insuffisants et que le contrôle des moustiques adultes est considéré, les pulvérisations en UBV sont donc généralement favorisées. Cette méthode est d'ailleurs la plus utilisée contre les moustiques adultes au Canada en raison de ces avantages sur les plans économiques et sécuritaires.

Tous les adulticides étudiés sont caractérisés par une action à large spectre, signifiant qu'ils affectent des organismes non ciblés. Ces produits sont donc susceptibles d'avoir un impact plus grand que les larvicides à la fois sur l'environnement et sur la santé humaine. Les produits étudiés sont notamment reconnus pour être très toxiques pour les poissons et les invertébrés aquatiques ainsi que pour plusieurs insectes utiles dont les abeilles. Il importe donc d'éviter des applications d'adulticides dans les milieux aquatiques et de mettre en place des mesures d'atténuation pour éviter l'exposition des espèces sensibles. La toxicité des adulticides seraient faible au regard des oiseaux et des mammifères. De façon générale, lorsqu'ils sont appliqués selon l'étiquette du produit, les adulticides étudiés s'avèrent peu toxiques pour l'humain.

7 RÉFÉRENCES

Abdel-Rahman, A., Dechkovskaia, A. M., Goldstein, L. B., Bullman, S. H., Khan, W., El Masry, E. M., Abou-Donia, M. B. (2004) Neurological deficits induced by malathion, DEET, and permethrin, alone or in combination in adult rats, *J. Toxicol. Environ. Health A,* Vol. 67, No. 4, pp. 331-356.

Abdel-Rahman, A., Shetty, A. K., Abou-Donia, M. B. (2001) Subchronic dermal application of N,N-diethyl m-toluamide (DEET) and permethrin to adult rats, alone or in combination, causes diffuse neuronal cell death and cytoskeletal abnormalities in the cerebral cortex and the hippocampus, and Purkinje neuron loss in the cerebellum, *Exp. Neurol.,* Vol. 172, No. 1, pp. 153-171.

Abou-Donia, M. B., Goldstein, L. B., Dechovskaia, A., Bullman, S., Jones, K. H., Herrick, E. A., Abdel-Rahman, A. A., Khan, W. A. (2001a) Effects of daily dermal application of DEET and epermethrin, alone and in combination, on sensorimotor performance, blood-brain barrier, and blood-testis barrier in rats, *J. Toxicol. Environ. Health A,* Vol. 62, No. 7, pp. 523-541.

Abou-Donia, M. B., Goldstein, L. B., Jones, K. H., Abdel-Rahman, A. A., Damodaran, T. V., Dechkovskaia, A. M., Bullman, S. L., Amir, B. E., Khan, W. A. (2001b) Locomotor and sensorimotor performance deficit in rats following exposure to pyridostigmine bromide, DEET, and permethrin, alone and in combination, *Toxicol. Sci.,* Vol. 60, No. 2, pp. 305-314.

Agence de réglementation de la lutte antiparasitaire (2006) *Bacillus sphaericus* souche 2362 - Note réglementaire REG2006-02, Santé Canada, pp. 1-53.

Agence de réglementation de la lutte antiparasitaire (2005a) Mise à jour sur la réévaluation de l'huile de citronnelle et des composés apparentés pour utilisation comme insectifuge personnel - Note de réévaluation REV2005-05, *Santé Canada,* pp. 1-2.

Agence de réglementation de la lutte antiparasitaire (2005b) Pre-Strike. Accessible au : http://eddenet.pmra-arla.gc.ca/4.0/4.1.asp. Consulté le 5-29-2006b.

Agence de réglementation de la lutte antiparasitaire (2004a) Abandon de produits agricoles homologués en vertu de la *Loi sur les produits antiparasitaires* et modifications proposées aux limites maximales de résidus en vertu de la *Loi sur les aliments et drogues* - Note de réévaluation REV2004-03, *Santé Canada,* pp. 1-6.

Agence de réglementation de la lutte antiparasitaire (2004b) Conseils de sécurité concernant l'utilisation d'insectifuges personnels. Accessible au : http://www.pmra-arla.gc.ca/francais/pdf/pnotes/deet-f.pdf. Consulté le 10-18-2004b.

Agence de réglementation de la lutte antiparasitaire (2004c) Produits antiparasitaires faisant l'objet d'une réévaluation - Abandon de produits non agricoles homologués en vertu de la *Loi sur les produits antiparasitaires* - Note de réévaluation REV2004-02, *Santé Canada,* pp. 1-2.

Agence de réglementation de la lutte antiparasitaire (2004d) Recherche dans le système ÉERÉ. Accessible au : http://eddenet.pmra-arla.gc.ca/francais/4.0/4.0.asp. Consulté le 10-22-2004d.

Agence de réglementation de la lutte antiparasitaire (2004e) Réévaluation de l'huile de citronnelle et des composés apparentés pour utilisation comme insectifuge personnel - Projet d'acceptabilité d'homologation continue PACR2004-36, *Santé Canada,* pp. 1-38.

Agence de réglementation de la lutte antiparasitaire (2003a) Fiche technique sur l'utilisation du malathion dans les programmes de lutte contre les moustiques. Accessible au : http://www.pmra-arla.gc.ca/francais/pdf/fact/fs_malathion-f.pdf.

Agence de réglementation de la lutte antiparasitaire (2003b) Réévaluation du malathion - Projet d'acceptabilité d'homologation continue PACR2003-10, *Santé Canada,* pp. 1-26.

Agence de réglementation de la lutte antiparasitaire (2002a) Insectifuges corporels contenant du DEET (N,N-diéthyl-m-toluamide et composés apparentés) - Décision de réévaluation RRD2002-01, *Santé Canada,* pp. 1-47.

Agence de réglementation de la lutte antiparasitaire (2002b) P-Menthane-3,8-diol - Projet de décision réglementaire PRDD2002-02, *Santé Canada,* pp. 1-18.

Agence de réglementation de la lutte antiparasitaire (2001a) Fiche technique sur l'utilisation du chlorpyrifos dans les programmes de lutte contre les moustiques. Accessible au : http://www.pmra-arla.gc.ca/francais/pdf/fact/fs_chlorpyrifos-f.pdf

Agence de réglementation de la lutte antiparasitaire (2001b) Fiche technique sur l'utilisation du méthoprène dans les programmes de lutte contre les moustiques. Accessible au : http://www.pmra-arla.gc.ca/francais/pdf/fact/fs_methoprene-f.pdf

Agence de réglementation de la lutte antiparasitaire (2001c) Fiche technique sur le *Bacillus thuringiensis* variété *israelensis* Bti. Accessible au : http://www.pmra-arla.gc.ca/francais/pdf/fact/fs_bti-f.pdf

Agence de réglementation de la lutte antiparasitaire (1999) Huile de soya - Projet de décision réglementaire PRDD99-02, *Santé Canada,* pp. 1-27.

Agence de santé publique du Canada (2005) Déclaration relative aux mesures de protection individuelle pour prévenir les piqûres ou morsures d'arthropodes, *Relevé des maladies transmissibles au Canada,* Vol. 31, No. DCC-4, pp. 1-20.

American Mosquito Control Association (2004) Mosquito Information. Accessible au : http://www.mosquito.org/mosquito-information/index.aspx. Consulté le 5-11-2004

Anderson, A. L., Apperson, C. S., Knake, R. (1991) Effectiveness of mist-blower applications of malathion and permethrin to foliage as barrier sprays for salt marsh mosquitoes, *J Am Mosq. Control Assoc.,* Vol. 7, No. 1, pp. 116-117.

Arredondo-Jimenez, J. I., Lopez, T., Rodriguez, M. H., Bown, D. N. (1990) Small scale field trials of *Bacillus sphaericus* (strain 2362) against anopheline and culicine mosquito larvae in southern Mexico, *J Am Mosq. Control Assoc.,* Vol. 6, No. 2, pp. 300-305.

Aubé-Maurice, B., Gingras, D. et Labbé, Y. (2005) *Problématique du virus du Nil occidental – Rapport sectoriel 1*. Rapport réalisé dans le cadre de l'étude d'impact stratégique du Plan d'intervention gouvernemental de protection de la santé publique contre le virus du Nil occidental par l'Institut national de santé publique du Québec, 92 p.

Badolo, A., Ilboudo-Sanogo, E., Ouedraogo, A. P., Costantini, C. (2004) Evaluation of the sensitivity of *Aedes aegypti* and *Anopheles gambiae* complex mosquitoes to two insect repellents: DEET and KBR 3023, *Trop. Med. Int. Health,* Vol. 9, No. 3, pp. 330-334.

Barnard, D. R. (2000) *Repellents and toxicants for personal protection - Global collaboration for development of pesticides for public health (GCDPP)*, WHO/CDS/WHOPES/GCDPP/2000.5. World Health Organization, 49 p.

Barnard, D. R., Bernier, U. R., Posey, K. H., Xue, R. D. (2002) Repellency of IR3535, KBR3023, para-menthane-3,8-diol, and deet to black salt marsh mosquitoes (Diptera: *Culicidae*) in the Everglades National Park, *J. Med. Entomol.,* Vol. 39, No. 6, pp. 895-899.

Barnard, D. R., Xue, R. D. (2004) Laboratory evaluation of mosquito repellents against *Aedes albopictus*, *Culex nigripalpus*, and *Ochlerotatus triseriatus* (Diptera: *Culicidae*), *J. Med. Entomol.,* Vol. 41, No. 4, pp. 726-730.

Batzer, D. P., Resh, V. H. (1992) Wetland management strategies that enhance waterfowl habitats can also control mosquitoes, *J Am Mosq. Control Assoc.,* Vol. 8, No. 2, pp. 117-125.

Bayer, A. G. (2004) Bayrepel; The new active ingredient in AUTANT. Accessible au : http://www.autant.com/nqcontent.cfm?a_id=171. Consulté le 9-17-2004

Beattie, G. (1994) *A 13-week toxicity study of aerosolized malathion administred by whole body inhalation exposure to the albino rat.* Lab Project Number: 90729. Unpublished study prepared by Product Safety Assessment, Bio-Research Labs Ltd.

Becker, N. (1997) Microbial control of mosquitoes: management of the upper rhine mosquito population as a model programme, *Parasitol Today,* Vol. 13, No. 12, pp. 485-487.

Becker, N., Petric, D., Zgomba, M., Boase, C., Dahl, C., Lane, J., Kaiser, A. (2003) *Mosquitoes and their control.* Kluwer academic Press/Plenum publishers, New York, 498 p.

Bell, J. W., Veltri, J. C., Page, B. C. (2002) Human exposures to N,N-diethyl-m-toluamide insect repellents reported to the American Association of Poison Control Centers 1993-1997, *Int. J. Toxicol.,* Vol. 21, No. 5, pp. 341-352.

Blomquist, L., Stroman, L., Thorsell, W. (1975) Distribution and fate of the insect repellent ^{14}C-N, N-diethyly-m-toluamide in the animal body. I. Distribution and excretion after injection into mice, *Acta Pharmacol. Toxicol. (Copenh),* Vol. 37, No. 2, pp. 121-133.

Blomquist, L. et W. Thorsell. (1977) Distribution and fate of the insect repellent 14C-N, N-diethyl-m-toluamide in the animal body. II. Distribution and excretion after cutaneous application. *Acta Pharmacol Toxicol*. 41(3): 235-243.

Boisvert, J. (2006) *Communication personnelle*. Université du Québec à Trois-Rivières, Département de chimie-biologie.

Boisvert, M., Boisvert, J. (2000) Effects of *Bacillus thuringiensis* var. *israelensis* on target and nontarget organisms : a review of laboratory and field experiments, *Biocontrol science and Technology,* Vol. 10, pp. 517-561.

Bourassa, J.-P. (2006) *Communication personnelle*. Université du Québec à Trois-Rivières, Département de chimie-biologie.

Bourassa, J.-P. (2000) *Le moustique, par solidarité écologique.* Boréal édition, 239 p.

Bourassa, J. P., Boisvert, J. (2004) *Le virus du Nil occidental : le connaître, réagir et se protéger.* Éditions MultiMondes, Sainte-Foy, Québec, 132 p.

Bourque, J.-F. (3-28-2001) Solutions pour les cimenteries afin de réduire les risques de transmission du virus du Nil occidental causés par la présence des pneus, Non publié.

Bouziani, I. (2004) *Communication personnelle*. Santé Canada, Agence de réglementation de la lutte antiparasitaire, Agente régionale des pesticides.

Briassoulis, G., Narlioglou, M., Hatzis, T. (2001) Toxic encephalopathy associated with use of DEET insect repellents: a case analysis of its toxicity in children, *Hum. Exp. Toxicol.,* Vol. 20, No. 1, pp. 8-14.

Brown, G.C., C.S. Willis, R.T. Trout. (2005) *Preliminary study of barrier residual applications as a spot treatment strategy for municipal mosquito management*. American mosquito control association, 71st meeting, April 3-7, 2005, Vancouver, BC, Canada.

Brown, M., Hebert, A. A. (1997) Insect repellents : an overview, *Journal of the American Academy of Dermatology,* Vol. 36, No. 2, pp. 243-249.

Brown T.M. et Brown, A.W.A. (1974) Experimental induction of resistance to a juvenile hormone mimic. *Journal of Economic Entomology*, 67: 799-801.

Brust, R. A., Ellis, R. A. (1976) Assessment of the emergency mosquito control operation in Manitoba, 1975, *Can J Public Health,* Vol. 67 Suppl 1, pp. 69-71.

Budaran, S., M.J. O'Neil, A. Smith, P.E Heckelman et J.F. Kinneary. (1996) *The Merck Index. An encyclopedia of chemicals, drugs and biological*. 12th ed N.J.

Butler, W.H., K.L. Gabriel, F.J. Preiss, Osimitz, T.G.. (1996) Lack of genotoxicty of piperonyl butoxide. *Mutation Research*, 371: 249-258.

California Environmental Protection Agency (CEPA). (1997) *Summary of toxicology data: Octyl-bicycloheptene-dicarboximide (MGK-264)*. Department of Pesticide Regulation, Medical toxicology Branch, Chemical code No. 000396, Tolerance No. 00367, SB 950 no. 082, 10 p.

Campbell, G. L., Marfin, A. A., Lanciotti, R. S., Gubler, D. J. (2002) West Nile virus, *Lancet Infect. Dis.,* Vol. 2, No. 9, pp. 519-529.

Carlson, D. B., Knight, R. L. (1987) Mosquito production and hydrological capacity of southeast Florida impoundments used for wastewater retention, *J Am Mosq. Control Assoc.,* Vol. 3, No. 1, pp. 74-83.

Carrigan, R. (1999) Do bats control mosquitoes?, *Wing Beats,* No. Spring 1999, pp. 4-5.

Cavanagh, H. M., Wilkinson, J. M. (2002) Biological activities of lavender essential oil, *Phytother. Res.,* Vol. 16, No. 4, pp. 301-308.

Centers for Disease Control and Prevention (2000) Illnesses associated with use of automatic insecticide dispenser units - selected States and United States, 1986-1999, *MMWR (Morbidity & Mortality Weekly Report),* Vol. 49, No. 22, pp. 492-495.

Centre antipoison du Québec (2004) *Information tirées des fiches de Toxins sur les huiles essentielles*

Chandre, F., Darrier, F., Manga, L., Akogbeto, M., Faye, O., Mouchet, J., Guillet, P. (1999) Status of pyrethroid resistance in *Anopheles gambiae* sensu lato, *Bull World Health Organ,* Vol. 77, No. 3, pp. 230-234.

Chappuis, S. (2002) Approche moléculaire de l'impact de *Bacillus thuringiensis israelensis* en tant que biopesticide : persistance et transfert génétique horizontal, après 12 ans d'applications dans une zone humide protégée (Bolle Di Magadino), Thèse de doctorat (No. 3377), Faculté des sciences de l'Université de Genève, Suisse.110 p.

Charles, J. F., Nielsen-LeRoux, C. (2000) Mosquitocidal bacterial toxins: diversity, mode of action and resistance phenomena, *Mem. Inst. Oswaldo Cruz,* Vol. 95, Suppl 1, pp. 201-206.

Chaussé, K. (2005) *Relations avec le milieu d'accueil – Rapport sectoriel 11*. Rapport réalisé dans le cadre de l'Étude d'impact stratégique du Plan d'intervention gouvernemental de protection de la santé publique contre le virus du Nil occidental. Institut national de santé publique du Québec. 78 p.

Chaussé, K., Aubé-Maurice, B., Labbé, Y. (2005) *Cadre législatif de l'application d'insecticides au Québec – Rapport sectoriel 2.* Rapport réalisé dans le cadre de l'Étude d'impact stratégique du Plan d'intervention gouvernemental de protection de la santé publique contre le virus du Nil occidental. Institut national de santé publique du Québec. 19 p.

Chenault, E. A. (2004) Insecticide resistance in mosquitoes being studied. Accessible au : http://agnews.tamu.edu/dailynews/stories/ENTO/Nov0504b.htm. Consulté le 11-11-2004

Chevalier, P., St-Laurent, L., Samuel, O., Bolduc, D. G. (2002) *Larvicides pour contrer la transmission du virus du Nil occidental chez les humains.* Institut national de santé publique du Québec, Québec, 46 p.

Chevillon, C., Bernard, C., Marquine, M., Pasteur, N. (2001) Resistance to *Bacillus sphaericus* in *Culex pipiens* (Diptera: *Culicidae*): interaction between recessive mutants and evolution in southern France, *J Med Entomol.,* Vol. 38, No. 5, pp. 657-664.

Choi, W. S., Park, B. S., Ku, S. K., Lee, S. E. (2002) Repellent activities of essential oils and monoterpenes against *Culex pipiens* pallens, *J. Am. Mosq. Control Assoc.,* Vol. 18, No. 4, pp. 348-351.

Clements, A. N. (1999) The biology of mosquitoes - Volume 2 - Sensory reception and behaviour CABI Publishing.

Cokmus, C., Hakki, S. A., Sacilik, S. C., Osmanagaoglu, O., Berber, I. (2000) Effects of UV-light on *Bacillus sphaericus* and its protection by chemicals, *J Basic Microbiol.,* Vol. 40, No. 4, pp. 215-221.

Combemale, P. (2001) [The prescription of repellents], *Med. Trop. (Mars.),* Vol. 61, No. 1, pp. 99-103.

Conti, L., Oiliveri R. (2001) West (Nile Virus) side story - Florida, *Wing Beats of the Florida Mosquito Control Association,* Vol. 12, No. 2, pp. 10-13.

Coro, F., Suarez, S. (2000) Review and history of electronic mosquito repellers, *Wing Beats,* No. Summer 2000, pp. 6, 7, 30 et 32.

Coto, M. M., Lazcano, J. A., de Fernandez, D. M., Soca, A. (2000) Malathion resistance in *Aedes aegypti* and *Culex quinquefasciatus* after its use in *Aedes aegypti* control programs, *J Am Mosq. Control Assoc.,* Vol. 16, No. 4, pp. 324-330.

Cox, C. (2004) Insecticide Factsheet - Resmethrin, *Journal of Pesticide Reform,* Vol. 24, No. 3, pp. 10-14.

Crans, W. J. (2004) *Aedes cantator* Coquillett. Accessible au : http://www.rci.rutgers.edu/~insects/sp22.htm (consulté le 21 juin 2005).

Crans, W. J. (1996) Products and promotion that have limited value for mosquito control. Accessible au : http://www.rci.rutgers.edu/~insects/proprom.htm. Consulté le 2-6-2006

Daly, I. (1996) *A 24-month oral toxicity/oncogenicity study of malathion in the rat via dietary administration*. Final Report, Lab Project Number: 93-2234. Unpublished study prepared by Huntington Life Sciences.

Daly, I. (1993a) *A 28-day study of malathion in the rat via dietary administration*. Unpublished report (study no. 92-3806) from Bio/Dynamics Inc, East Millstone, New Jersey, USA. Submitted to WHO by CHeminova, Lemvig, Denmark.

Daly, I. (1993b) *A subchronic (3-month) oral toxicity study of malathion in the rat via dietary administration*. Unpublished report (study no. 92-3843) from Bio/Dynamics Inc, East Millstone, New Jersey, USA. Submitted to WHO by CHeminova, Lemvig, Denmark.

Dame, D.A., Wichterman, G.J., Hornby, J.A. (1998) Mosquito (*Aedes taeniorhynchus*) resistance to methoprene in an isolated habitat. *Journal of the American Mosquito Control Association*, 14: 200-203.

Das, M. K., Ansari, M. A. (2003) Evaluation of repellent action of Cymbopogan martinii martinii Stapf var sofia oil against *Anopheles sundaicus* in tribal villages of Car Nicobar Island, Andaman & Nicobar Islands, India, *J. Vector. Borne. Dis.,* Vol. 40, No. 3-4, pp. 100-104.

Das, N. G., Baruah, I., Talukdar, P. K., Das, S. C. (2003) Evaluation of botanicals as repellents against mosquitoes, *J. Vector. Borne. Dis.,* Vol. 40, No. 1-2, pp. 49-53.

Davidson, E. W. (1984) Microbiology, pathology and genetics of *Bacillus sphaericus* : biological aspects which are important to field use, *Mosquito News,* Vol. 44, No. 2- Part I, pp. 147-152.

de Barjac, H., Frachon, E. (1990) Classification of *Bacillus thuringiensis* strains. Entomophaga. 35 : 233-240.

Decima Research (2005) *Public Health Agency of Canada - West Nile Virus Tracking Survey - Final Report - Fall 2005* POR-05-49, 23 p.

Decima Research (2004) *Health Canada - West Nile Virus 2004 Tracking Survey - Final Report* POR-04-30, 34 p.

Decima Research (2003) *Health Canada : West Nile Virus Tracking Survey - Final Report - September 2003* POR-165-03, 28 p.

de Oliveira, C. M., Filho, F. C., Beltran, J. E., Silva-Filha, M. H., Regis, L. (2003) Biological fitness of a *Culex quinquefasciatus* population and its resistance to *Bacillus sphaericus*, *J Am Mosq. Control Assoc.,* Vol. 19, No. 2, pp. 125-129.

Desfor Bioservices (2003) *Plan de surveillance du virus du Nil occidental sur les lieux d'entreposage de pneus hors d'usage au Québec - Rapport d'étape*, 12 p.

Dugal, J. (2005) *Communication personnelle*. Valent Biosciences Corporation.

Duke, J.A. (1985) *CRC Handbook of Medicinal Herbs*. CRC Press. Boca Raton, Floride.

Edwards, D. L., Johnson, C. E. (1987) Insect-repellent-induced toxic encephalopathy in a child, *Clin. Pharm.,* Vol. 6, No. 6, pp. 496-498.

Elliott, S. J., Loeb, M., Eyles, J., Harrington, D. (2003) *Results of a West Nile Virus Seroprevalence Survey, South Oakville, Ontario, 2003*, McMaster Institute of Environment and Health, Ministry of Health and Long-Term Care (Ontario), 1-37.

Ellis, R. (2004) *Municipal mosquito control guidelines* (3rd revision), 53 p.

Ellis, R. A. (2005) *Use and Effectiveness of Permethrin Residual Spraying for WNv Vector Management*, BC Center for Disease Control and Prevention Society Branch, 33 p.

Ellis, R. A. (1976) Emergency measures and mosquito control operations during the 1975 western encephalomyelitis outbreak in Manitoba, *Can J Public Health,* Vol. 67 Suppl 1, pp. 59-60.

Enache A.J. (2005) Communication personnelle. United States Environemntal Protection Agency (US EPA), Facilities Raritan Depot.

Extoxnet (1996a) Allethrin. Accessible au : http://extoxnet.orst.edu/pips/allethri.htm

Extoxnet (1996b) Malathion. Accessible au : http://extoxnet.orst.edu/pips/malathio.htm

Extoxnet (1996c) Permethrin. Accessible au : http://extoxnet.orst.edu/pips/permethr.htm. Consulté le 5-17-2006c

Extoxnet (1996d) Resmethrin. Accessible au : http://extoxnet.orst.edu/pips/resmethr.htm. Consulté le 5-15-2006d

Extoxnet (1994) Pyrethrins and pyrethroids. Accessible au : http://extoxnet.orst.edu/pips/pyrethri.htm

Floore, T., Rolen, K., Medrano, G., Jones, F. (2002) Operational studies with Valent VectoLex WDG, *Bacillus sphaericus*, in three Florida Mosquito Control Districts, *J Am Mosq. Control Assoc.,* Vol. 18, No. 4, pp. 344-347.

Florida coordinating council on mosquito control (1998) *Florida mosquito control : The state of the mission as defined by mosquito controllers, regulators, and environmental managers*

Foster, W. A., Lutes, K. I. (1985) Tests of ultrasonic emissions on mosquito attraction to hosts in a flight chamber, *J Am Mosq. Control Assoc.,* Vol. 1, No. 2, pp. 199-202.

Fradin, M. S. (2001) Insect repellents Dans *Comprehensive dermatologic drug therapy*, Wolvertun SE, ed., Philadelphia, pp. 717-734.

Fradin, M. S. (1998) Mosquitoes and mosquito repellents: a clinician's guide, *Ann Intern Med,* Vol. 128, No. 11, pp. 931-940.

Fradin, M. S., Day, J. F. (2002) Comparative efficacy of insect repellents against mosquito bites, *N Engl J Med,* Vol. 347, No. 1, pp. 13-18.

Frances, S. P., Van Dung, N., Beebe, N. W., Debboun, M. (2002) Field evaluation of repellent formulations against daytime and nighttime biting mosquitoes in a tropical rainforest in northern Australia, *J. Med. Entomol.,* Vol. 39, No. 3, pp. 541-544.

Frances, S. P., Waterson, D. G., Beebe, N. W., Cooper, R. D. (2004) Field evaluation of repellent formulations containing deet and picaridin against mosquitoes in Northern Territory, Australia, *J. Med. Entomol.,* Vol. 41, No. 3, pp. 414-417.

Frick, T. B., Tallamy, D. W. (1996) Density and diversity of nontarget insects killed by suburban electric insect traps, *Entomological News,* Vol. 107, No. 2, pp. 77-82.

Fuligni, D. (2001) *Mosquito control and pesticides use in Massachusetts*, Masters degree project - Department of urban and environmental policy - Tufts University - Massachusetts, 30 p.

GDG Environnement (2002) *Programme de surveillance des moustiques dans les dépôts de pneus usagés du Québec - Compte-rendu des activités de la saison 2002 - Rapport final*, 34 p.

GDG Environnement (2001) *Efficacité du procédé de mise en ballots à réduire la production de moustiques pour le stockage et le transport des pneus usagés*, 23 p.

Georghiou, G.P. , Wirth, M.C. (1997) Influence of exposure to single versus multiple toxins of *Bacillus thuringiensis* subsp. *israelensis* on development of resistance in the mosquito *Culex quinquefasciatus* (Diptera:Culicidae). *Applied and Environmental Microbiology*, 63 : 1095-1101.

Glare, T. R., O'Callaghan, M. (1999) *Environmental and health impacts of the insect juvenile hormone analogue, S-methoprene*, Biocontrol and Biodiversity, 106 p.

Glare, T. R., O'Callaghan, M. (1998) *Environmental and health impacts of Bacillus thuringiensis israelensis*, Biocontrol & Biodiversity, 58 p.

Goldenthal, E.I. (1990a) *Evaluation of pyrethrum extract in an 18-month dietary oncogenic study in mice*. Unpublished report, laboratory project ID : 556-013, MRID #41559401 from International Research & Development Corporation. Submitted to WHO by Kenya Pyrethrum Information Centre, Oberalm, Austria.

Goldenthal, E.I. (1990b) *Evaluation of pyrethrum extract in two-yar dietary toxicity and oncogenicity study in rats.* Unpublished report, laboratory project ID : 556-011, MRID #41559501 from International Research & Development Corporation. Submitted to WHO by Kenya Pyrethrum Information Centre, Oberalm, Austria.

Goldenthal, E.I. (1988) *Evaluation of pyrethrum extract in a 13-week dose range-finding study in rats.* Unpublished report, laboratory project ID : 556-010 from International Research & Development Corporation. Submitted to WHO by Kenya Pyrethrum Information Centre, Oberalm, Austria.

Gouvernement du Canada (1991) La politique fédérale sur la conservation des terres humides, *Environnement Canada, Ottawa,* pp. 1-15.

Gouvernement de l'Ontario (2004) Ce que vous devez savoir et ce que vous pouvez faire à propos du virus du Nil occidental, *Ministère de la santé de l'Ontario*.

Gouvernement de l'Ontario (2003) Le virus du Nil occidental, les moustiques et quelques mythes qui ont la vie dure, *Ministère de la santé de l'Ontario*.

Gouvernement du Québec (2005) *Viruzzzzzzzz du Nil - Plan d'intervention gouvernemental de protection de la santé publique contre le virus du Nil occidental 2005.* Ministère de la Santé et des Services sociaux, 17 p.

Gouvernement du Québec (2004a) Malathion (MAL). Accessible au : http://www.menv.gouv.qc.ca/pesticides/virus-nil/fiche-malathion.pdf

Gouvernement du Québec (2004b) Perméthrine (PFL). Accessible au : http://www.menv.gouv.qc.ca/pesticides/virus-nil/fiche-permethrine.pdf

Gouvernement du Québec (2004c) Resméthrine (REZ). Accessible au : http://www.menv.gouv.qc.ca/pesticides/virus-nil/fiche-resmethrine.pdf

Gouvernement du Québec (2004d) *Viruzzzzzzzz du Nil - Plan d'intervention gouvernemental de protection de la santé publique contre le virus du Nil occidental.* Ministère de la Santé et des Services sociaux, 20 p.

Gouvernement du Québec (2001) Guide pour l'étude des technologies conventionnelles du traitement des eaux usées d'origine domestique. Accessible au : http://www.menv.gouv.qc.ca/eau/eaux-usees/domestique/

Gouvernement du Québec (2000) Politique québécoise de gestion des matières résiduelles 1998-2008. Gazette officielle du Québec, 132e année, no 39

Govere, J., Braack, L. E., Durrheim, D. N., Hunt, R. H., Coetzee, M. (2001) Repellent effects on *Anopheles arabiensis* biting humans in Kruger Park, South Africa, *Med. Vet. Entomol.,* Vol. 15, No. 3, pp. 287-292.

Grand dictionnaire terminologique (2005) Définition du terme Insectifuge. Accessible au : http://www.granddictionnaire.com/btml/fra/r_motclef/index1024_1.asp

Griggs, M.P., Jefferson, N.D., Blair, M., Spicer, E.J.F. (1982) Bioallethrin : 6-month dietary toxicity study in dogs. IRDC Mattawan, Michigan, 69 p. (Report No. IRDC-BA-406.034/A) (Unpublished proprietary data supplied by Roussel Uclaf).

Grondin, N. (1998) Entomologie : Bêtes noires. *Québec Sciences*, 36(10): 50-53.

Haddad, L. M., Shannon, M. W., Winchester, J. F. (1998) Section F : Pesticides. The organophosphates and other insecticides Dans *Clinical management of poisonning and drug overdose, 3rd edition*, pp. 836-844.

Hadis, M., Lulu, M., Mekonnen, Y., Asfaw, T. (2003) Field trials on the repellent activity of four plant products against mainly Mansonia population in western Ethiopia, *Phytother. Res.,* Vol. 17, No. 3, pp. 202-205.

Hampers, L. C., Oker, E., Leikin, J. B. (1999) Topical use of DEET insect repellent as a cause of severe encephalopathy in a healthy adult male, *Acad Emerg. Med,* Vol. 6, No. 12, pp. 1295-1297.

Han, L.Z. (1988) Selection of resistance ti biological insecticide, *Bacillus thuringiensis* var. *israelensis* in *Culex pipiens pallens*. *Contributions from Shanghai Institute of Entomology*, 8 : 153-156.

Hanoski, J. M., Niemi, G. J., Lima, A. R., Regal, R. R. (1997a) Do mosquito control treatments of wetlands affect red-winged blackbird (*Agelaius phoneniceus*) growth, reproduction, or behavior?., *Environ. Toxicol. Chem.,* Vol. 16, pp. 1014-1019.

Hanoski, J. M., Niemi, G. J., Lima, A. R., Regal, R. R. (1997b) Response of breeding birds to mosquito control treatments of Wetlands, *Wetlands,* Vol. 17, pp. 485-492.

Hazardous Substances Data Bank (HSDB) (2005). National Library of Medicine, Bethesda, Maryland (electronic version). Thomson MICROMEDEX, Greenwood Village, Colorado, USA. (édition se terminant le 30 juin 2005).

Hasardous Substances Data Bank (HSDB) (2001a) Allethrin. Accessible au : http://toxnet.nlm.nih.gov/cgi-bin/sis/download.txt. Consulté le 12-6-2004a

Hasardous Substances Data Bank (HSDB) (2001b) Pyrethrin. Accessible au : http://toxnet.nlm.nih.gov/cgi-bin/sis/download.txt. Consulté le 12-6-2004b

Hayes Jr., W. J., Laws Jr., E. R. (1991) Repellents Dans *Handbook of pesticide toxicology*, Academic Press Inc.San Diego,California, pp. 1500-1505.

Helson, B. V., Surgeoner, G. A. (1983) Permethrin as a residual lawn spray for adult mosquito control, *Mosquito News,* Vol. 43, No. 2, pp. 164-169.

Helson, B. V., Wright, R. E. (1977) Field evaluation of electronic mosquito-repellers in Ontario, *Proceedings of the Entomological Society of Ontario,* Vol. 108, pp. 59-62.

Hemingway, J., Ranson, H. (2000) Insecticide resistance in insect vectors of human disease, *Annu Rev Entomol.,* Vol. 45, pp. 371-391.

Henderson J.M., Knepper, R.G., Fanara, D.M. (1985) *Field studies of temperature effects on ULV malathion, chlorpyrifos, and resmethrin on Culex pipiens*. Proc. New Jersey Mosq. Control Assoc., 72nd Annual meeting, Atlantic City, 1985. pp. 212-232.

Henrick, C. A., Ko, J., Nguyen, J., Burleson, J., Lindahl, G., Van Gundy, D., Edge, J. M. (2002) Investigation of the relationship between s-methoprene and deformities in anurans, *J Am Mosq. Control Assoc.,* Vol. 18, No. 3, pp. 214-221.

Hougard, J.-M., Mbentengam, R., Lochouarn, L., Escaffre, H., Darriet, F., Barbazan, P., Quillévéré, D. (1993) Lutte contre *Culex quinquefasciatus* par *Bacillus sphaericus* : résultats d'une campagne pilote dans une grande agglomération urbaine d'Afrique équatoriale, *Bulletin de l'Organisation mondiale de la Santé,* Vol. 71, pp. 367-375.

Hruby, T., Montgomery, W. G., Lent, R. A., Dobson, N. (1985) Open marsh water management in Massachusetts: adapting the technic to local conditions and its impact on mosquito larvae during the first season, *J Am Mosq. Control Assoc.,* Vol. 1, No. 1, pp. 85-88.

Insecticide National Steering Evaluation Comittee Team (2001) *Guidelines for the prevention of West Nile virus infection in Canada using chemical insecticides to control adult mosquitoes*, 1-29.

Integrated Risk Information System (IRIS). (2004) US Environmental Protection Agency, Washington, D.C. (electronic version). Thomson MICROMEDEX, Greenwood Village, Colorado, USA.

Integrated Risk Information System (IRIS). (1996). Site Internet accessible au : http://www.toxnet.nlm.nih.gov.

International Agency for Research on Cancer (IARC) (1991) *Occupational Exposure in Insecticides Application and Some Pesticides*, IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans. Organisation mondiale de la santé, Lyon, France, vol. 53, 612 p.

International Chemical Safety Cards (ICSC) (2001) Bioalléthrine. Accessible au : http://www.cdc.gov/niosh/ipcsnfrn/nfrn0227.html. Consulté le 12-2-2004

International Programme on Chemical Safety (IPCS) (2000) *Join FAO/WHO Meeting on Pesticides Residues. Pesticide Residues in Food – 1999 Part II – Toxicological.* Organisation mondiale de la santé, Genève, p. 273-292. WHO/PCS/00.4.

International Programme on Chemical Safety (IPCS) (1998) *Join FAO/WHO Meeting on Pesticides Residues. Pesticide Residues in Food – 1997, Evaluation 1997, Part II-Toxicological and Environmental.* World Health Organisation, 1998, WHO/PCS/98.6, p. 189-219.

International Programme on Chemical Safety (IPCS) (1992) *Pesticide residues in food – 1991 evaluations. Part II – Toxicology*. FAO Plant Production and Protection Paper 100/2, nos 785-801 on INCHEM.

International Programme on Chemical Safety (IPCS) (1989) *Environmental Health Criteria 87 – Allethrins – Allethrin, d-Allethrin, Bioallethrin, S-Bioallethrin*. Organisation mondiale de la santé, Genève, 75 p.

International Society For Infectious Diseases (2003) ProMED-mail West Nile Virus Vaccine, Equine Safety - USA - Archive no 20030726.1830. Accessible au : www.promedmail.org. Consulté le 7-26-2003

Ivan, M., Schopflocher, D. P., Svenson, L. W., Tilley, P., Keays, G. (2005) *Estimating the infection rate of West Nile virus in Alberta*, Alberta Health and Wellness, 51 p.

Jensen, T., Lampman, R., Slamecka, M. C., Novak, R. J. (2000) Field efficacy of commercial antimosquito products in Illinois, *J Am Mosq. Control Assoc.,* Vol. 16, No. 2, pp. 148-152.

Jensen, T., Lawler, S. P., Dritz, D. A. (1999) Effects of ultra-low volume pyrethrin, malathion, and permethrin on nontarget invertebrates, sentinel mosquitoes, and mosquitofish in seasonally impounded wetlands, *J Am Mosq. Control Assoc.,* Vol. 15, No. 3, pp. 330-338.

Jiannino, J. A., Walton, W. E. (2004) Evaluation of vegetation management strategies for controlling mosquitoes in a southern California constructed wetland, *J Am Mosq. Control Assoc.,* Vol. 20, No. 1, pp. 18-26.

Kent, R., Sakolsky-Hoopes, G. (1999) The use of fish in mosquito control programs in the northeast U.S., *Wing Beats,* No. Fall 1999, pp. 20, 21 et 23.

Klasco RK (2005) (Ed): REPROTEXT ® Database (electronic version). Thomson MICROMEDEX, Greenwood Village, Colorado, USA. (édition se terminant le 30 juin 2005).

Klein, D., Uspensky, I., Braun, S. (2002) Tightly bound binary toxin in the cell wall of *Bacillus sphaericus*, *Appl. Environ Microbiol.,* Vol. 68, No. 7, pp. 3300-3307.

Kline, D. L. (2002) Evaluation of various models of propane-powered mosquito traps, *J Vector Ecol.,* Vol. 27, No. 1, pp. 1-7.

Kline, D. L., Takken, W., Wood, J. R., Carlson, D. A. (1990) Field studies on the potential of butanone, carbon dioxide, honey extract, 1-octen-3-ol, L-lactic acid and phenols as attractants for mosquitoes, *Med Vet. Entomol.,* Vol. 4, No. 4, pp. 383-391.

Kluh, S., Metzger, M. E., Messer, D. F., Hazelrigg, J. E., Madon, M. B. (2002) Stormwater, BMPs, and vectors : the impact of new BMP construction on local public health agencies, *Stormwater - The journal for surface water quality professionals,* Vol. 3, No. 2, pp. 40-46.

Klun, J. A., Khrimian, A., Margaryan, A., Kramer, M., Debboun, M. (2003) Synthesis and repellent efficacy of a new chiral piperidine analog: comparison with Deet and Bayrepel activity in human-volunteer laboratory assays against *Aedes aegypti* and *Anopheles stephensi*, *J. Med. Entomol.,* Vol. 40, No. 3, pp. 293-299.

Knepper, R. G. (1988) Efficacy of a ULV insecticide mixture (HAN-malathion-resmethrin) against caged *Culex* mosquitoes, *J Am Mosq. Control Assoc.,* Vol. 4, No. 4, pp. 561-562.

Knepper, R. G., Walker, E. D., Kamrin, M. A. (2003) ULV studies of permethrin in Saginaw, Michigan, *Wing Beats,* No. Winter 2003, pp. 22-23 et 32-33.

Knight, R. L., Walton, W. E., O'Meara, G. F., Reisen, W. K., Wass, R. (2003) Strategies for effective mosquito control in constructed treatment wetlands, *Ecological Engineering,* Vol. 21, pp. 211-232.

Koné, P., Lambert, L., Milord, F. (2005) *Épidémiologie du virus di Nil occidental en zonre rurale au Québec*. Projet de recherche réalisé dans le cadre de l'étude d'impact sur l'environnement du programme de pulvérisations aériennes d'insecticides pour contrer le virus du Nil occidental en cas d'épidémie. Équipe Zoonoses, Direction des risques biologiques, environnementaux et occupationnels, Institut national de santé publique du Québec et Groupe d'expertise sur le VNO de la DSP de la Montérégie. 166 p.

Koné, P., Lambert, L., Milord, F., Gariépy, C. (2003) *Épidémiologie et effets de l'infection par le virus du Nil occidental sur la santé humaine : mise à jour 2003*, Institut national de santé publique du Québec, Montréal, 74 p.

Konradsen, F., Matsuno, Y., Amerasinghe, F. P., Amerasinghe, P. H., van der, H. W. (1998) *Anopheles culicifacies* breeding in Sri Lanka and options for control through water management, *Acta Trop.,* Vol. 71, No. 2, pp. 131-138.

Koren, G., Matsui, D., Bailey, B. (2003) DEET-based insect repellents: safety implications for children and pregnant and lactating women, *CMAJ.,* Vol. 169, No. 3, pp. 209-212.

Kristan, M., Fleischmann, H., della, T. A., Stich, A., Curtis, C. F. (2003) Pyrethroid resistance/susceptibility and differential urban/rural distribution of *Anopheles arabiensis* and *An. gambiae* s.s. malaria vectors in Nigeria and Ghana, *Med Vet Entomol.,* Vol. 17, No. 3, pp. 326-332.

Kynoch, S. et Smith, P. (1986) *Delayed contact hypersensitivity in the guinea-pig with malathion (Fyfanon) technical: 8666D/CHV 37/SS.* Unpublished study prepared by Huntington Research Centre Ltd.

La Clair, J. J., Banthe, J. A., Dumont, J. (1998) Photoproducts and metabolites of a common insect growth regulator produce developmental deformities in Xenopus, *Environmental Science and Technology,* Vol. 32, pp. 1453-1461.

Lacey, L. A., Merritt, R. W. (2003) The safety of bacterial microbial agents used for black fly and mosquito control in aquatic environments. Dans *Environmental Impacts of Microbial Insecticides: Need and Methods for Risk Assessment.(H.M.T.Hokkanen and A.E.Hajek, eds.)*, Kluwer Academic Publishers Dordrech, The Netherlands, pp. 151-168

Lacoursière, J., Boisvert, J. (2004) Le *Bacillus thuringiensis israelensis* et le contrôle des insectes piqueurs au Québec. Accessible au : http://www.menv.gouv.qc.ca/pesticides/virus-nil/bti/index.htm

Laliberté, C., Hubert, B., Corriveau, R., Farley, C., Bolduc, D., Lavigne, J., Pilon, P. A., Lambert, L. (2005) *Mesures individuelles et collectives pour prévenir la transmission du virus du Nil occidental - Éléments pour un plan global d'intervention.* Institut national de santé publique du Québec, Québec, 69 p.

Lawler, S. P., Jensen, T., Dritz, D. A., Wichterman, G. (1999) Field efficacy and nontarget effects of the mosquito larvicides temephos, methoprene, and *Bacillus thuringiensis* var. *israelensis* in Florida mangrove swamps, *J Am Mosq. Control Assoc.,* Vol. 15, No. 4, pp. 446-452.

Les Consultants RSA (1993) *Systèmes de traimtement des eaux usées par marais artificiels, artificielle, Étude de techniques de remplacement applicables à l'assainissement des eaux usées de petites agglomérations*, réalisée pour la Société québécoise d'assainissement des eaux (SQAE). Accessible au ftp://biblionumerique.gouv.qc.ca/menv/1993/EN930143-rapport.pdf.

Lewis, D. J., Fairchild, W. L., Leprince, D. J. (1982) Evaluation of an electronic mosquito repeller, *The Canadian Entomologist,* Vol. 114, pp. 699-702.

Liggett, M.et Parcell, B. (1985a) *Irritant effects on rabbit skin of malathion (Fyfanon) technical: 851221D/CHV 35/SE*. Unpublished study prepared by Huntington Research Centre Ltd.

Liggett, M.et Parcell, B. (1985b) *Irritant effects on rabbit skin of malathion (Fyfanon) technical: 851214D/CHV 36/SE*. Unpublished study prepared by Huntington Research Centre Ltd.

Lindsay, R. (2004) Communication personnelle. Étude sur le terrain, Laboratoire national des zoonoses et des agents pathogènes, Laboratoire national de microbiologie, Agence de santé publique du Canada, Winnipeg.

Lindsay, L. R., Gallaway, W. J., Anderson, R. A. (2005) Evaluation of the efficacity of ground-based adulticiding against *Culex tarsalis* mosqitoes and WNV in two rural communities in southern Manitoba, Canada.

Liu, H., Cupp, E. W., Micher, K. M., Guo, A., Liu, N. (2004) Insecticide resistance and cross-resistance in Alabama and Florida strains of *Culex quinquefasciatus* [correction], *J Med Entomol.,* Vol. 41, No. 3, pp. 408-413.

Liu, H. S., Mead, J. L., Stacer, R. G. (1998) *Environmental impacts of recycled rubber in light fill applications : summary & evaluation of existing literature - Technical report #2*, 1-16.

Liu, W., Zhang, J., Hashim, J. H., Jalaludin, J., Hashim, Z., Goldstein, B. D. (2003) Mosquito coil emissions and health implications, *Environ Health Perspect,* Vol. 111, No. 12, pp. 1454-1460.

Lord, J. C. (1991) Sustained release pellets for control of *Culex* larvae with *Bacillus sphaericus*, *J Am Mosq. Control Assoc.,* Vol. 7, No. 4, pp. 560-564.

Ludwig, M., Beck, M., Zgomba, M., Becker, N. (1994) The impact of water quality on the persistence of *Bacillus sphaericus*, *Bull. Soc. Vector Ecol.,* Vol. 19, No. 1, pp. 43-48.

Lukwa, N., Molgaard, P., Mutambu, S. L., Musana, B. J. (2002) Seven essential oils inhibit *Anopheles arabiensis* mosquito biting, *Cent. Afr. J. Med.,* Vol. 48, No. 11-12, pp. 141-143.

Maddocks-Jennings, W. (2004) Critical incident: idiosyncratic allergic reactions to essential oils, *Complement Ther. Nurs. Midwifery,* Vol. 10, No. 1, pp. 58-60.

Maire, A., Aubin, A. (1980) *Les moustiques du Québec (diptera : culicidae) - Essai de synthèse écologique* No 6, 107 p.

Masson, L., Brousseau, R., Viel, G., Bidon, Y. (2003) *Recherche d'isolats indigènes de Bacille de thuringe serovar israelensis (Bti) dans l'environnement naturel québécois*, Institut de recherche en biotechnologie (Conseil national de recherches du Canada) et AEF Global - Rapport synthèse réalisé par AEF Global dans le cadre d'une étude subventionnée par le programme d'aide à la recherche et au développement en environnement du ministère de l'Environnement du Québec, 8 p.

Mayhew, C. R., Raman, D. R., Gerhardt, R. R., Burns, R. T., Younger, M. S. (2004) Periodic draining reduces mosquito emergence from free-water surface constructed wetlands, *Transactions of the ASAE (The Society for engineering in agricultural, food, and biological systems),* Vol. 47, No. 2, pp. 567-573.

McAbee, R. D., Kang, K. D., Stanich, M. A., Christiansen, J. A., Wheelock, C. E., Inman, A. D., Hammock, B. D., Cornel, A. J. (2004) Pyrethroid tolerance in *Culex pipiens pipiens* var *molestus* from Marin County, California, *Pest Manag. Sci,* Vol. 60, No. 4, pp. 359-368.

McCarthy, T. A., Hadler, J. L., Julian, K., Walsh, S. J., Biggerstaff, B. J., Hinten, S. R., Baisley, C., Iton, A., Brennan, T., Nelson, R. S., Achambault, G., Marfin, A. A., Petersen, L. R. (2001) West Nile virus serosurvey and assessment of personal prevention efforts in an area with intense epizootic activity: Connecticut, 2000, *Ann N Y. Acad Sci.,* Vol. 951, pp. 307-316.

McGready, R., Hamilton, K. A., Simpson, J. A., Cho, T., Luxemburger, C., Edwards, R., Looareesuwan, S., White, N. J., Nosten, F., Lindsay, S. W. (2001) Safety of the insect repellent N,N-diethyl-M-toluamide (DEET) in pregnancy, *Am. J. Trop. Med. Hyg.,* Vol. 65, No. 4, pp. 285-289.

Means, R.G. (1981). Mosquitoes of New York-Part 1: The genus Aedes Meigen with identification keys to genera of Culicidae. State Science Service-New York State Museum, Albany, NY, pp. 59-61.
Accessible au : http://www.rci.rutgers.edu/~insects/sp14.htm (consulté le 21 juin 2005).

Mekuria, Y., Williams, D. C., Hyatt, M. G., Zack, R. E., Gwinn, T. A. (1994) Malathion resistance in mosquitoes from Charleston and Georgetown counties of coastal South Carolina, *J Am Mosq. Control Assoc.,* Vol. 10, No. 1, pp. 56-63.

Merritt, R. W., Lessard, J. L., Wessell, K. J., Hernandez, O., Berg, M. B., Wallace, J. R., Novak, J. A., Ryan, J., Merritt, B. (2005) Lack of effects of *Bacillus sphaericus* (Vectolex®) on nontarget organisms in a mosquito-control program in southeastern Wisconsin : a 3-year study, *Journal of the American Mosquito Control Association,* Vol. 21, No. 2, pp. 201-212.

Metzger, M. E. (2004) Managing Mosquitoes in Stormwater Treatment Devices. Accessible au : http://www.mosquitoes.org/downloads/8125.pdf. Consulté le 11-29-2004

Metzger, M. E., Mersser, D. F., Beitia, C. L., Myers, C. M., Kramer, V. L. (2002) The Dark Side of Stromwater Runoff Management : Disease Vectors Associated With Structural BMPs, *Stormwater - The journal for surface water quality professionals,* Vol. 3, No. 2, pp. 24-39.

Michigan Mosquito Control Association (2002) An Aerial Adulticiding Exercise in Saginaw, MI, Proceedings of the: *16th Annual Meeting Thompsonville*, January 31 - February 1, 2002.

Miladin, S. (2004) Mosquito management going underground, *Wing Beats,* No. Fall 2004, pp. 10-12.

Miller, J. R. (2001) The control of mosquito-borne diseases in New York City, *J Urban Health,* Vol. 78, No. 2, pp. 359-366.

Ministère de la Santé et des Services sociaux (2004) Viruzzz du Nil. Accessible au : http://www.virusdunil.info/flash_fr.php. Consulté le 10-19-2004

Ministère des Transports du Québec (2006) Réseau routier, Gestion écologique de la végétation, Projets expérimentaux - Écosystème. Accessible au : http://www.mtq.gouv.qc.ca/fr/reseau/gestion_eco/ecosystmee.asp. Consulté le 3-27-2006

Ministère des Transports du Québec (2003) *La gestion de la végétation des corridors autoroutiers - La nouvelle approche québécoise "En harmonie avec la nature"*, 10 p.

Mitchell, C. J., Hayes, R. O., Holden, P., Hill, H. R., Hughes, T. B., Jr. (1969) Effects of ultra-low volume applications of malathion in Hale County, Texas. I. Western encephalitis virus activity in treated and untreated towns, *J Med Entomol.,* Vol. 6, No. 2, pp. 155-162.

Mitchell, C. J., Kilpatrick, J. W., Hayes, R. O., Curry, H. W. (1970) Effects of ultra-low volume applications of malathion in Hale County, Texas. II. Mosquito populations in treated and untreated areas, *J Med Entomol.,* Vol. 7, No. 1, pp. 85-91.

Mittal, P. K. (2003) Biolarvicides in vector control: challenges and prospects, *J Vector Borne. Dis.,* Vol. 40, No. 1-2, pp. 20-32.

Mittal, P. K., Adak, T., Sharma, V. P. (1993) Effect of temperature on toxicity of two bioinsecticides spherix (*Bacillus sphaericus*) and bactoculicide (*Bacillus thuringiensis*) against larvae of four vector mosquitoes, *Indian J Malariol.,* Vol. 30, No. 1, pp. 37-41.

Moore, S. J., Lenglet, A., Hill, N. (2002) Field evaluation of three plant-based insect repellents against malaria vectors in Vaca Diez Province, the Bolivian Amazon, *J. Am. Mosq. Control Assoc.,* Vol. 18, No. 2, pp. 107-110.

Moreno, O. (1989) 21-*Day dermal toxicity study with AC 6,601 in rabbits: Laboratory Report No. MB88-9191*. Unpublished study prepared by MB Research Laboratories Inc.

Mostashari, F., Bunning, M. L., Kitsutani, P. T., Singer, D. A., Nash, D., Cooper, M. J., Katz, N., Liljebjelke, K. A., Biggerstaff, B. J., Fine, A. D., Layton, M. C., Mullin, S. M., Johnson, A. J., Martin, D. A., Hayes, E. B., Campbell, G. L. (2001) Epidemic West Nile encephalitis, New York, 1999: results of a household-based seroepidemiological survey, *Lancet,* Vol. 358, No. 9278, pp. 261-264.

Mulla, M. S., Darwazeh, H. A., Davidson, E. W., Dulmage, H. T. (1984) Efficacy and persistence of the microbial agent *Bacillus sphaericus* against mosquito larvae in organically enriched habitats, *Mosquito News,* Vol. 44, No. 2 - Part I, pp. 166-174.

Mulla, M. S., Rodcharoen, J., Ngamsuk, W., Tawatsin, A., Pan-Urai, P., Thavara, U. (1997) Field trials with *Bacillus sphaericus* formulations against polluted water mosquitoes in a suburban area of Bangkok, Thailand, *J Am Mosq. Control Assoc.,* Vol. 13, No. 4, pp. 297-304.

Mulla, M. S., Thavara, U., Tawatsin, A., Chomposri, J., Su, T. (2003) Emergence of resistance and resistance management in field populations of tropical *Culex quinquefasciatus* to the microbial control agent *Bacillus sphaericus*, *J Am Mosq. Control Assoc.,* Vol. 19, No. 1, pp. 39-46.

Murphy, S.D. (1986) *Toxic effects of pesticides*, Chap. 18. Dans: Casarett and Doull's toxicology, the basic science of poisons, third edition (Eds: Klaassen, C. D. et M. O. Amdur et J. Doull) Macmillan publishing Co. New York, Ny, pp 519-581.

Nalca, A., Fellows, P. F., Whitehouse, C. A. (2003) Vaccines and animal models for arboviral encephalitides, *Antiviral Res,* Vol. 60, No. 3, pp. 153-174.

Nasci, R. S., Harris, C. W., Porter, C. K. (1983) Failure of an insect electrocuting device to reduce mosquito biting, *Mosquito News,* Vol. 43, No. 2, pp. 180-184.

National Pesticide Telecommunications Network (2000a) *DEET (General Fact Sheet). Document préparé pour U.S. Environmental Protection Agency. United States. 4 p.*

National Pesticide Telecommunications Network (2000b) *Piperonyl Butoxide (General Fact Sheet). Document préparé pour U.S. Environmental Protection Agency. United States. 4 p.*

National Pesticide Telecommunications Network (1998) *Pyrethrins & Pyrethroids (General Fact Sheet). Document préparé pour U.S. Environmental Protection Agency. United States. 4 p.*

Navarro-Ortega, A., Marquetti, M.d.C., Valdes, S. et Garcia, F.A. (1991) Tolerance of *Culex quinquefasciatus* Say, 1823 (Diptera : Culicidae) to methoprene in Cuba. *Memorias do Instituto Oswaldo Cruz*, 86 : 493.

Nayar, J. K., Knight, J. W., Ali, A., Carlson, D. B., O'Bryan, P. D. (1999) Laboratory evaluation of biotic and abiotic factors that may influence larvicidal activity of *Bacillus thuringiensis* serovar. *israelensis* against two Florida mosquito species, *J Am Mosq. Control Assoc.,* Vol. 15, No. 1, pp. 32-42.

Newton, P.E. (1992) *90-day inhalation toxicity study of pyrethrum extract in the rat via whole body exposure*. Unpublished report, project No. 91-8335, MRID #42478201 from Bio/dynamics Inc. Submitted to WHO by Kenya Pyrethrum Information Centre, Oberalm, Austria.

New York City Department of Health (2001) *Final environmental impact statement - Adult mosquito control programs* CEQR No : 00DOH0024

Nielsen-LeRoux, C., Pasteur, N., Pretre, J., Charles, J. F., Sheikh, H. B., Chevillon, C. (2002) High resistance to *Bacillus sphaericus* binary toxin in *Culex pipiens* (Diptera: Culicidae): the complex situation of west Mediterranean countries, *J Med Entomol.,* Vol. 39, No. 5, pp. 729-735.

Niemi, G. J., Hershey, A. E., Shannon, L., Hanowski, J. M., Lima, A., Axler, R. P., Regal, R. R. (1999) Ecological effects of mosquito control on zooplankton, insects, and birds, *Environ. Toxicol. Chem.,* Vol. 18, pp. 549-559.

Oliphant, T., Engle, M., Nybakken, G. E., Doane, C., Johnson, S., Huang, L., Gorlatov, S., Mehlhop, E., Marri, A., Chung, K. M., Ebel, G. D., Kramer, L. D., Fremont, D. H., Diamond, M. S. (2005) Development of a humanized monoclonal antibody with therapeutic potential against West Nile virus, *Nat. Med,* Vol. 11, No. 5, pp. 522-530.

Organisation mondiale de la Santé (2000) *Report of the fourth WHOPES working group meeting. Review of : IR3535, KBR3023, (RS-Methoprene 20% EC), Pyriproxyfen 0,5% GR and Lambda-cyhalothrin 2,5% CS. Geneva, 4-5 december 2000*, 102 p.

Oyedele, A. O., Gbolade, A. A., Sosan, M. B., Adewoyin, F. B., Soyelu, O. L., Orafidiya, O. O. (2002) Formulation of an effective mosquito-repellent topical product from lemongrass oil, *Phytomedicine.,* Vol. 9, No. 3, pp. 259-262.

Padilha, d. P., Gomes-Carneiro, M. R., Paumgartten, F. J. (2003) Chemical composition, toxicity and mosquito repellency of Ocimum selloi oil, *J. Ethnopharmacol.,* Vol. 88, No. 2-3, pp. 253-260.

PAN Pesticides Database - Chemicals (2003) *Bacillus sphaericus* - Identification, toxicity, use, water pollution potential, ecological toxicity and regulatory information. Accessible au : http://preview.pesticidesinfo.org/. Consulté le 20030

Parsley, A. G., Deschamps, T. D. (2005) *Resistance to Scourge® Insecticide in the Mosquito Populations of Four Towns in the Central Mass. Mosquito Control Project Service Area: Westborough, billerica, Tewksbury and Wilmington*, 1-10.

Passos, A. D., Rodrigues, E. M., Dal Fabbro, A. L. (1998) Dengue control in Ribeirao Preto, Sao Paulo, Brazil, *Cad. Saude Publica,* Vol. 14 Suppl 2, pp. 123-128.

Pei, G., Oliveira, C. M., Yuan, Z., Nielsen-LeRoux, C., Silva-Filha, M. H., Yan, J., Regis, L. (2002) A strain of *Bacillus sphaericus* causes slower development of resistance in *Culex quinquefasciatus*, *Appl. Environ Microbiol.,* Vol. 68, No. 6, pp. 3003-3009.

Perich, M. J., Tidwell, M. A., Dobson, S. E., Sardelis, M. R., Zaglul, A., Williams, D. C. (1993) Barrier spraying to control the malaria vector *Anopheles albimanus* : laboratory and field evaluation in the Dominican Republic, *Medical and Veterinary Entomology,* Vol. 7, pp. 363-368.

Petersen, L. R., Marfin, A. A., Gubler, D. J. (2003) West Nile virus, *JAMA,* Vol. 290, No. 4, pp. 524-528.

Peterson, C. (2003) Insect repellants in urban settings, *Biologist (London),* Vol. 50, No. 1, pp. 39-43.

Pont, D., Franquet, E., Tourenq, J. N. (1999) Impact of different *Bacillus thuringiensis* variety *israelensis* treatments on a chironimid (*Diptera chironomidae*) community in a temporary marsh, *Journal of Economic Entomology,* Vol. 92, No. 2, pp. 266-272.

The Purple Martin Conservation Association (2002) Attracting and Managing purple martins. Accessible au : Http://www.purplemartin.org/main/mgt.html. Consulté le 11-1-2002

Qiu, H., Jun, H. W., McCall, J. W. (1998) Pharmacokinetics, formulation, and safety of insect repellent N,N-diethyl-3-methylbenzamide (deet): a review, *J Am Mosq. Control Assoc.,* Vol. 14, No. 1, pp. 12-27.

Ramoska, W. A., Pacey, C. (1979) Food availability and period of exposure as factors of *Bacillus sphaericus* efficacy on mosquito larvae, *J Econ. Entomol.,* Vol. 72, No. 4, pp. 523-525.

Recyc-Québec (2004) Programme de vidage des lieux d'entreposage de pneus hors d'usage - Mesures prises par Recyc-Québec pour prévenir le virus du Nil.

Recyc-Québec (2001) *Programme de vidage des lieux d'entreposage de pneus hors d'usage au Québec 2001-2008 - Cadre normatif*, 16 p.

Registry of Toxic Effects of Chemical Substances (2003) Lavender Oil. RTECS # OF6110000. Accessible au : www.cdc.gov/niosh/rtecs/of5d3b30.html. Consulté le 9-16-2004

Riviere, J. E., Baynes, R. E., Brooks, J. D., Yeatts, J. L., Monteiro-Riviere, N. A. (2003) Percutaneous absorption of topical N,N-diethyl-m-toluamide (DEET): effects of exposure variables and coadministered toxicants, *J. Toxicol. Environ. Health,* Vol. 66, No. 2, pp. 133-151.

Robbins, P. J., Cherniack, M. G. (1986) Review of the biodistribution and toxicity of the insect repellent N,N-diethyl-m-toluamide (DEET), *J Toxicol. Environ Health,* Vol. 18, No. 4, pp. 503-525.

Roberts, J. R., Reigart, J. R. (2004) Does anything beat DEET?, *Pediatr. Ann.,* Vol. 33, No. 7, pp. 444-453.

Roland, E. H., Jan, J. E., Rigg, J. M. (1985) Toxic encephalopathy in a child after brief exposure to insect repellents, *Can. Med Assoc. J,* Vol. 132, No. 2, pp. 155-156.

Ross, E. A., Savage, K. A., Utley, L. J., Tebbett, I. R. (2004) Insect repellant interactions: sunscreens enhance deet (N,N-diethyl-m-toluamide) absorption, *Drug Metab Dispos.,* Vol. 32, No. 8, pp. 783-785.

Royal, A. (2004) A new tool for the control of mosquitoes, biting midges, and flies, *Wing Beats,* No. Spring 2004, pp. 18, 19 et 22.

Ruman R. (2005) Communication personnelle. Pennsylvania Department of Health, Commonwealth News Bureau.

Samuel, O., St-Laurent, L. (2005) *Profil toxicologique des insecticides retenus pour le contrôle des insectes adultes impliqués dans la transmission du virus du Nil occidental au Québec*, Institut national de santé publique du Québec, 76 p.

Samuel, O., St-Laurent, L. (2000) *Avis concernant le choix d'un adulticide pour le contrôle des insectes afin de contrer la transmission du virus du Nil occidental au Québec*, 1-31.

Sanfaçon, G., Lessard, S., Schnebelen, M., Bolduc, D. G., Paul, M. (2002) *Efficacité et risques des moyens de protection personnelle contre la transmission du virus du Nil occidental.* Institut national de santé publique du Québec, Québec, 77 p.

Santé Canada (2000) Conseils sur l'utilisation d'insectifuges personnels. Direction générale de la santé de la population et de la santé publique, Ottawa, Canada. Accessible au : http://www.hc-sc.gc.ca/hpb/lcdc/publicat/info/repell_f.html. Consulté le 5-17-2000

Sato, H., Arai, M. Hagiwara, A., Arai, M. (1985) *Chronic toxicity and oncogenicity study of Pynamin Forte in rats*. Nagoya, Japan, Daiyu-kai Institute of Medical Sciences (Technical Report No. KT-51-0058) (Proprietary data made available by Sumimoto Chemical Co., Ltd).

Schardein, J.L. (1989) *Two generation reproduction study in rats with pyrethrum extract.* Unpublished report, laboratory project ID : IRDC 556-005, MRID #41327501 from International Research & Development Corporation. Submitted to WHO by Kenya Pyrethrum Information Centre, Oberalm, Austria.

Scheinfeld, N. (2004) Picaridin: a new insect repellent, *J. Drugs Dermatol.,* Vol. 3, No. 1, pp. 59-60.

Schwartz, C.S., Gephart, L., Gecci, P.J., Parent, R.A. (1979) *The evaluation of the effetcs os SBP-1382 following dietary administration through three generations in Sprague-Dawley rats.* Waverly, New York, Food and Drug Research Laboratories, 70 p. (Report No. 5739) (Unpublished proprietary data supplied by Roussel Uclaf).

Seleena, P., Lee, H., Lecadet, M. M. (1997) A novel insecticidal serotype of *Clostridium bifermentas*, *J. Am. Mosq. Control Assoc.,* Vol. 13, pp. 395-397.

Selim, S., Hartnagel, R. E., Jr., Osimitz, T. G., Gabriel, K. L., Schoenig, G. P. (1995) Absorption, metabolism, and excretion of N,N-diethyl-m-toluamide following dermal application to human volunteers, *Fundam. Appl. Toxicol.,* Vol. 25, No. 1, pp. 95-100.

Servant, P., Rosso, M. L., Hamon, S., Poncet, S., Del cluse, A., Rapoport, G. (1999) Production of Cry11A and Cry11Ba toxins in *Bacillus sphaericus* confers toxicity towards *Aedes aegypti* and resistant *Culex* populations, *Appl. Environ Microbiol.,* Vol. 65, No. 7, pp. 3021-3026.

Sharma, V. P. (2001) Health hazards of mosquito repellents and safe alternatives, *Current science,* Vol. 80, No. 3, pp. 341-343.

Siegel, J. P., Shadduck, J. A. (1990) Clearance of *Bacillus sphaericus* and *Bacillus thuriingiensis* ssp. *israelensis* from mammals, *J. Econ. Entomol.,* Vol. 83, No. 2, pp. 347-355.

Siglin, J. (1985) *A resubmission of rabbit teratology study*, FDRL Study No. 8171 (MRID 152569), with Appendix III included.

Silva-Filha, M.-H., Regis, L., Nielsen-Leroux, C., Charles, J.-F. (1995) Low-Level Resistance to *Bacillus sphaericus* in a Field-Treated Population of *Culex quinquefasciatus* (Diptera : Culicidae), *Journal of Economic Entomology,* Vol. 88, No. 3, pp. 525-530.

Silva-Filha, M. H., Regis, L., Oliveira, C. M., Furtado, A. E. (2001) Impact of a 26-month *Bacillus sphaericus* trial on the preimaginal density of *Culex quinquefasciatus* in an urban area of Recife, Brazil, *J Am Mosq. Control Assoc.,* Vol. 17, No. 1, pp. 45-50.

Sithiprasasna, R., Jaichapor, B., Chanaimongkol, S., Khongtak, P., Lealsirivattanakul, T., Tiang-Trong, S., Burkett, D. A., Perich, M. J., Wirtz, R. A., Coleman, R. E. (2004) Evaluation of candidate traps as tools for conducting surveillance for Anopheles mosquitoes in a malaria-endemic area in western Thailand, *J Med Entomol.,* Vol. 41, No. 2, pp. 151-157.

Skovmand, O., Guillet, P. (2000) Sedimentation of *Bacillus sphaericus* in tap water and sewage water, *J Invertebr. Pathol.,* Vol. 75, No. 4, pp. 243-250.

Slauter, R. (1994) *18-Month oral (dietary) oncogenicity study in mice: Malathion: Lab Project Number: 668-001*. Unpublished study prepared by International Research and Development Corp.

Snodgrass, H. L., Nelson, D. C., Weeks, M. H. (1982) Dermal penetration and potential for placental transfer of the insect repellent, N,N-diethyl-m-toluamide, *Am Ind. Hyg. Assoc. J,* Vol. 43, No. 10, pp. 747-753.

Société de protection des forêts contre les insectes et maladies (2005a) *Conditions préalables et disponibilité du matériel en vue de la mise sur pied d'un programme efficace de traitements aux adulticides pour le contrôle des moustiques*, 55 p.

Société de protection des forêts contre les insectes et maladies (2005b) *L'utilisation du traitement barrière dans le contrôle des moustiques vecteurs du virus du Nil occidental - Rapport final*, 102 p.

Société de protection des forêts contre les insectes et maladies (2005c) *Relevé des gîtes à Culex en milieu urbain - Projet de recherche réalisé dans le cadre de l'étude d'impact sur l'environnement du programme de pulvérisation aérienne d'insecticides pour contrer le virus du Nil occidental en cas d'épidémie - Rapport final*, 94 p.

Société de protection des forêts contre les insectes et maladies (2005d) *Revue des connaissances sur les larvicides à base de Bacillus sphaericus - Revue de littérature réalisée dans le cadre de l'étude d'impact sur l'environnement du programme de pulvérisation aérienne d'insecticides pour contrer le virus du Nil occidental en cas d'épidémie - Rapport final*, 31 p. + 1 annexe.

Société de protection des forêts contre les insectes et maladies (2005e) *Suivi des populations de moustiques adultes dans des zones traitées et non traitées de la région métropolitaine de Montréal - Été 2004 - Projet de recherche réalisé dans le cadre de l'étude d'impact sur l'environnement du programme de pulvérisation aérienne d'insecticides pour contrer le virus du Nil occidental en cas d'épidémie - Rapport final*, 63 p.

Société de protection des forêts contre les insectes et maladies (2005f) *Volet application de larvicides en prévention - Saison 2005 - Plan d'intervention gouvernemental contre le virus du Nil occidental - Rapport des travaux*, 209 p.

Société de protection des forêts contre les insectes et maladies (2004) *Volet application de larvicides en prévention - Saison 2004 - Plan d'intervention gouvernemental contre le virus du Nil occidental - Rapport des travaux*, 125 p. + cartes.

Société de protection des forêts contre les insectes et maladies (2003) *Volet application de larvicides en prévention - Saison 2003 - Plan d'intervention gouvernemental contre le virus du Nil occidental - Rapport des travaux*, 70 p.

Su, T., Mulla, M. S. (1999) Field evaluation of new water-dispersible granular formulations of *Bacillus thuringiensis* ssp. *israelensis* and *Bacillus sphaericus* against *Culex* mosquitoes in microcosms, *J Am Mosq. Control Assoc.,* Vol. 15, No. 3, pp. 356-365.

Surgeoner, G. A., Helson, B. V. (1977) A field evaluation of electrocutors for mosquito control in southern Ontario, *Proceedings of the Entomological Society of Ontario,* Vol. 108, pp. 53-57.

Takahashi, O., S. Oishi, T. Fujitani, T. Tanaka, Yoneyama, M.. (1997) Chronic toxicity of piperonyl butoxide in CD-1 mice : induction of hepatocellular carcinoma. *Toxicology*, 124: pp. 95-103.

Takahashi, O., S. Oishi, T. Fujitani, T. Tanaka, Yoneyama, M.. (1994) Chronic Toxicity studies of Piperonyl Butoxide in F344 rats : induction of hepatocellular carcinoma. *Fundamental and Applied Toxicology*, 22: pp. 293-303.

Tawatsin, A., Wratten, S. D., Scott, R. R., Thavara, U., Techadamrongsin, Y. (2001) Repellency of volatile oils from plants against three mosquito vectors, *J. Vector. Ecol.,* Vol. 26, No. 1, pp. 76-82.

Tenenbein, M. (1987) Severe toxic reactions and death following the ingestion of diethyltoluamide-containing insect repellents, *JAMA,* Vol. 258, No. 11, pp. 1509-1511.

Tesh, R. B., Arroyo, J., Travassos Da Rosa, A. P., Guzman, H., Xiao, S. Y., Monath, T. P. (2002) Efficacy of killed virus vaccine, live attenuated chimeric virus vaccine, and passive immunization for prevention of West Nile virus encephalitis in hamster model, *Emerg. Infect. Dis.,* Vol. 8, No. 12, pp. 1392-1397.

Tisch, M., Schmezer, P., Faulde, M., Groh, A., Maier, H. (2002) Genotoxicity studies on permethrin, DEET and diazinon in primary human nasal mucosal cells, *Eur. Arch. Otorhinolaryngol.,* Vol. 259, No. 3, pp. 150-153.

United States Environmental Protection Agency (2005) P-Menthane-3,8-diol (011550) biopesticide registration eligibility document. Accessible au : http://www.epa.gov./pesticides/biopesticides/ingredients/tech_docs/tech_011550.htm. Consulté le 2-8-2005

United States Environmental Protection Agency (US EPA) (2005b) *Permethrin*. HED Chapter of the Reregistration Eligibility Decision Document (RED). PC Code 109701, Case No. 52645-53-1, DP Barcode D319234. Office of Prevention, Pesticides and Toxic Substances, July 19, 2005, 143 p.

United States Environmental Protection Agency (US EPA) (2004a) *Chemicals evaluated for carcinogenic potential. Science Information Mamagement branch*, Health Effects Division, Office of Pesticides Programs, July 19, 2004, 22 p.

United States Environmental Protection Agency (US EPA) (2004b) *Pyrethrins*. Acute and Chronic DIetary Exposure Assessment for the Reassessmentment Eligibilty Decision (RED) Document. Office of Prevention, Pesticides and Toxics Substances, 58 p.

United States Environmental Protection Agency (US EPA) (2004c) *N-Octyl bicycloheptène dicarboximide (MGK-264): HED Chapter of the Reregistration Eligibility Decision Document (RED).* Office of Prevention, Pesticides and Toxic Substances, PC Code: 057001, Case #: 2430, DP Barcode: D295642, October 5, 2004, 79 p.

United States Environmental Protection Agency (US EPA) (2004d) *Chemicals Evaluated for Carcinogenic Potential*. Office of Pesticide Programs Health Effects Division, July 19 2004, 20 p.

United States Environmental Protection Agency (2001) June 2001 updated of the March 1991 Methoprene R.E.D. fact sheet - Office of prevention, pesticides and toxic substances. Accessible au : www.epa.gov/pesticides/biopesticides/ingredients/factsheets/factsheet_105401.df

United States Environmental Protection Agency (US EPA) (2000a) *Background Document for the Session : A Consultation on the Proposed Health Effect*. Division Classification on the Human Carcinogenic Potential of Malathion, Health Effects Division, Office of Pesticides Programs, July 19, 2000, 6 p.

United States Environmental Protection Agency (US EPA) (2000b) Malathion : Human health risk assessment for the reregistration eligibilty decision (RED). Office of Prevention, Pesticides and Toxic Substances, Chemical No. 057701, Case No. 0248, Barcode D 269070, September 22, 2000, 89 p.

United States Environmental Protection Agency (US EPA) (2000c) *Malathion : The toxicology chapter for the RED*. Office of Prevention, Pesticides and Toxic Substances, Case No. 818961, Barcode D 265266, April 27, 2000, 38 p.

United States Environmental Protection Agency (US EPA) (2000d) *Revised Preliminary HED Risk Assessment for Dichlorvos.* Office of Prevention, Pesticides and Toxic Substances, DP Barcode D267106, August 9, 2000, 74 p.

United States Environmental Protection Agency (1999) Citronella (Oil of Citronella) (021901) Fact Sheet. Accessible au : www.epa.gov/pesticides/biopesticides/ingredients/factsheets/factsheet_021901. htm. Consulté le 9-20-2005.

United States Environmental Protection Agency (1998a) *Bacillus sphaericus*; exemption from the requirement of a tolerance. Accessible au : http://www.epa.gov/fedrgstr/EPA-PEST/1998/September/Day-11/p24469.htm

United States Environmental Protection Agency (1998b) *Reregistration Eligibility Decision (RED) DEET* EPA738-R-98-010, 118 p.

United States Environmental Protection Agency (1998c) *Reregistration eligibility document (RED) : Bacillus thuringiensis*, EPA738-R-98-004, 157 p.

United States Environmental Protection Agency (US EPA) (1998d) *Review of malathion incident reports.* Office of Prevention, Pesticides and Toxic Substances, Chemical No. 057701, Case No. 0248, Barcode D 247492, August 18, 1998, 38 p.

United States Environmental Protection Agency (1997) *R.E.D. Facts, Oil of Citronella* EPA-738-F-97-002, 6 p.

University of California - Division of Agriculture and Natural Resources (1998) Mosquitoes - Integrated pest management around the home, *Pest Notes,* No. Publication 7451.

Valcke, M., Belleville, D. (2002) *Évaluation des risques toxicologiques associés à l'utilisation d'adulticides dans le cadre d'un programme de lutte vectorielle contre la transmission du virus du Nil occidental, rapport final*, Institut national de santé publique du Québec, Québec, 89 p. + annexes.

Valcke, M., Gosselin, N. H., Belleville, D., Vézina, A. (2005) *Évaluation du risque toxicologique associé à l'utilisation d'adulticides dans le cadre d'un programme de lutte vectorielle contre le virus du Nil occidental (VNO) - Mise à jour de nouvelles données et approche raffinée*, Institut national de santé publique du Québec, 164 p.

Vercoe, R.R. et Malone, J.C. (1969) *Dermal irritancy of pyrethroids and piperonyl butoxide to rabbits*. Berkhamsted, United Kingdom, Wellcome Foundation Ltd, 5 p. (Report No. WELL-BA-69.19.03/A) (Unpublished proprietary data supplied by Roussel Uclaf).

Wagner, S.L. (2000) Fatal asthma in a child after use of an animal shampoo containing pyrethrin. *West. J. Med.,* 173 :86-87.

Wallwork, L., Clampitt, R.B., Malone, J.C. (1972) Bioallethrin rat oral 90-day toxicity study. Berkhamsted, United Kingdom, Wellcome Foundation Ltd, 77 p. (Report No. WELL-BA-75.16-02/A) (Unpublished proprietary data supplied by Roussel Uclaf).

Walsh, B. (2003) Gambusia - The Mosquitofish, *Wing Beats,* Vol. Fall 2003, pp. 32-33.

Wassmer, D. A., Morris, C. (1998) Florida mosquitocide use during fiscal year 1994-1995, *Wing Beats,* No. Winter 1998, pp. 8-19.

Wax, P.M. et Hoffman, R.S. (1994) Fatality associated with inhalation of a pyrethrin shampoo. *Clin. Toxicol*., 32(4) :457-460.

Westchester county board of health (2001) *Draft Generic Environmental Impact Statement - Comprehensive Mosquito-Borne Disease - Surveillance and Control Plan*

Wilks, (2000) Pyrethroid-induced paresthesia : a central or local toxic effect? *J. Toxicol. Clin. Toxicol.* 38(2) :103-5.

Wirth, M. C., Georghiou, G. P., Federici, B. A. (1997) CytA enables CryIV endotoxins of *Bacillus thuringiensis* to overcome high levels of CryIV resistance in the mosquito, *Culex quinquefasciatus*, *Proc. Natl Acad Sci USA,* Vol. 94, No. 20, p. 10 536-10 540.

Wirth, M. C., Georghiou, G. P., Malik, J. I., Abro, G. H. (2000) Laboratory selection for resistance to *Bacillus sphaericus* in *Culex quinquefasciatus* (Diptera: Culicidae) from California, USA, *J Med Entomol.,* Vol. 37, No. 4, pp. 534-540.

Wolfe, R. J. (1996) Effects of open marsh water management on selected tidal marsh resources: a review, *J Am Mosq. Control Assoc.,* Vol. 12, No. 4, pp. 701-712.

Wood, D. M. (1985) *Diptères piqueurs du Canada qui s'attaquent à l'homme et au bétail.* Institut de recherches biosystématiques, Agriculture Canada, 39 p.

World Health Organization (1999) *Environmental Health Criteria 217 - Bacillus thuringiensis.* Inter-organization programme for the sound management of chemicals, 105 p.

World Health Organization (1982) Manual on environmental management for mosquito control with special emphasis on malaria vectors, *WHO Offset Publ.,* No. 66, pp. 1-283.

World Health Organization/International Programme on Chemical Safety (WHO/IPCS). (2001) *Ukpid Monograph pyrethroids*. In: IPCS INTOX CD-ROM.

Yadava, R. L., Rao, C. K., Biswas, H., Narasimham, M. V. (1991) Vector control through environmental management with special reference to India-approach prospectives, *J Commun. Dis.,* Vol. 23, No. 2, pp. 79-88.

Yaffe, B. (2004) *West Nile Virus 2003 Program Evaluation*, Toronto Public Health. Accessible au : http://www.city.toronto.on.ca/health/westnile/pdf/wnv_evaluation_final.pdf., 61 p. + annexes.

Yang, Y. C., Lee, E. H., Lee, H. S., Lee, D. K., Ahn, Y. J. (2004) Repellency of aromatic medicinal plant extracts and a steam distillate to *Aedes aegypti*, *J. Am. Mosq. Control Assoc.,* Vol. 20, No. 2, pp. 146-149.

Yap, H. H. (1987) Microbial insecticides in aquatic environments : factors affecting efficacy in the field, *Food & Fertilizer Technology Center,* No. 104 (Technical Bulletin), pp. 1-9.

Yuan, Z. M., Pei, G. F., Regis, L., Nielsen-LeRoux, C., Cai, Q. X. (2003) Cross-resistance between strains of *Bacillus sphaericus* but not *B. thuringiensis israelensis* in colonies of the mosquito *Culex quinquefasciatus*, *Med Vet. Entomol.,* Vol. 17, No. 3, pp. 251-256.

Zahiri, N. S., Su, T., Mulla, M. S. (2002) Strategies for the management of resistance in mosquitoes to the microbial control agent *Bacillus sphaericus*, *J Med Entomol.,* Vol. 39, No. 3, pp. 513-520.

ANNEXE A

TRAITEMENTS POUR RÉDUIRE LES POPULATIONS DE MOUSTIQUES RESPONSABLES DE LA NUISANCE

Annexe A Traitements pour réduire les populations de moustiques responsables de la nuisance

Plusieurs personnes confondent les interventions menées par le ministère de la Santé et des Services sociaux (MSSS) visant à éliminer ou à réduire de façon importante les populations de moustiques vecteurs du virus du Nil occidental (VNO) avec les programmes visant à réduire les populations de moustiques responsables de la nuisance.

Les sections qui suivent présentent les différents aspects relatifs aux traitements contre les insectes piqueurs responsables de problèmes de nuisance (principalement les moustiques et les mouches noires) dans le contexte québécois de manière à bien distinguer les différences avec les interventions menées par le MSSS contre le VNO. La nature de ces interventions est décrite dans un premier temps. Un portrait de ce type de traitement au Québec est dressé dans un deuxième temps, comportant un aperçu des produits actuellement privilégiés pour combattre les insectes piqueurs et les endroits où de tels traitements sont jugés nécessaires par les autorités locales.

1 DÉFINITION

La notion de nuisance réfère au degré d'inconfort occasionné par les insectes dits « piqueurs » (moustiques et mouches noires) à une période précise de l'année et dans une région donnée. Les traitements effectués pour contrôler cette nuisance visent donc à améliorer la qualité de vie des gens en diminuant l'abondance des insectes piqueurs qui incommodent régulièrement aux humains. Ces traitements existent au Québec depuis quelques décennies et sont effectués à la demande de certaines municipalités ou entreprises privées. Ainsi, contrairement aux traitements prévus par le MSSS contre les moustiques vecteurs du VNO, les traitements de nuisance ne visent pas à protéger la santé de la population.

Pour évaluer le degré de nuisance et la nécessité d'effectuer ou non un traitement, l'opinion de la population d'une région donnée est généralement combinée avec l'abondance des insectes piqueurs sur le même territoire. Pour mesurer cette abondance, on peut, par exemple compter le nombre de piqures sur les bras d'un individu volontaire par unité de temps ou bien recourir à l'utilisation d'un filet pour mesurer le taux de capture des insectes piqueurs autour d'un individu immobile servant d'appât (Lacoursière et Boisvert, 2004).

2 ESPÈCES CIBLÉES

Les traitements contre la nuisance occasionnée par les insectes piqueurs visent un plus grand nombre d'espèces que les traitements préventifs contre la transmission du VNO encadrées par le MSSS. Plusieurs espèces de moustiques tirent profit des caractéristiques naturelles particulières de l'environnement québécois (climat humide, couverture forestière importante, fonte d'une grande quantité de neige au printemps, abondance de lacs et de

rivières, etc.) pour se reproduire en grand nombre et atteindre, à certaines périodes de l'année, des densités impressionnantes pouvant incommoder de façon non négligeable les populations de certaines régions. Cette importante présence de moustiques ainsi que d'autres insectes piqueurs (en particulier les mouches noires) justifiait parfois, bien avant l'arrivée du VNO, des interventions humaines pour limiter leur abondance.

Les espèces responsables de la nuisance appartiennent principalement à quatre familles de l'ordre des diptères : les tabanidés (mouches à chevreuil), les cératopogonidés (brûlots), les simulidés (mouches noires) et les culicidés (moustiques) (Lacoursière et Boisvert, 2004). Ce sont les représentants de ces deux dernières familles qui causent les problèmes de nuisance les plus importants, tandis que seuls les culicidés (moustiques) peuvent transmettre le VNO. Une cinquantaine d'espèces de moustiques et plus de 70 espèces de mouches noires se trouvent au Québec et environ 90 % d'entre-elles sont hématophages, c'est-à-dire qu'elles se nourrissent de sang (Lacoursière et Boisvert, 2004). En effet, la femelle de ces espèces nécessite au moins un repas sanguin pour compléter le cycle de maturation des œufs précédant la ponte.

Au Québec, les espèces de moustiques les plus susceptibles de développer des populations suffisamment importantes pour occasionner des problèmes de nuisance appartiennent majoritairement au genre *Ochlerotatus*, qui est le genre de culicidé le mieux représenté sur le territoire québécois (Maire et Aubin, 1980). Les espèces problématiques appartenant à d'autres genres incluent notamment certaines *Aedes* ou *Culiseta* ainsi que *Coquillettidia perturbans* (Lacoursière et Boisvert, 2004). La proportion d'espèces nuisantes est beaucoup plus faible chez les mouches noires; trois espèces de simulidés occasionnent le plus souvent des problèmes de nuisance (*Prosimulium mixtum, Simulium truncatum* et *Simulium venustum*). Trois ou quatre autres espèces du genre *Simulium* peuvent également atteindre des densités problématiques pour la population (Lacoursière et Boisvert, 2004).

3 PRODUITS UTILISÉS

Si les traitements contre la nuisance ont parfois été réalisés à l'aide d'adulticides dans le passé, ils ne se font plus désormais qu'avec l'aide de larvicides étant donné la toxicité moindre de ces produits. Cette méthode permet de combattre les insectes piqueurs avant même qu'ils n'atteignent le stade adulte, étape de leur vie à laquelle ils représentent un problème pour les humains. Le contrôle larvaire a également pour avantage de cibler des milieux où les insectes piqueurs sont présents en densité très élevée. Les moustiques de même que les mouches noires sont en effet concentrés dans certains types de milieux humides où ils passent les premiers stades de leur vie (larve ou nymphe) ce qui permet une grande efficacité des traitements.

L'ingrédient actif le plus utilisé comme larvicide au Québec est le *Bacillus thuringiensis* var*. israelensis* (*Bti)*. Le méthoprène a également été parfois utilisé au Québec pour le contrôle des insectes piqueurs. Il s'agit d'un insecticide efficace sur un grand nombre d'insectes dont les culicidés et les simulidés. L'utilisation du méthoprène a été peu à peu délaissée avec l'arrivée du *Bti*, mais il est encore utilisé sur le territoire québécois dans certaines

circonstances. Il s'agit en effet de l'insecticide de choix pour combattre les larves de *Coquillettidia perturbans* (Bourque, 2004), une des principales espèces responsables de la nuisance au Québec (Lacoursière et Boisvert, 2004).

4 PÉRIODE VISÉE

La majorité des espèces de moustiques et de mouches noires profitent de l'importante quantité d'eau suivant la fonte des neiges dans les forêts québécoises pour compléter leur cycle de reproduction (les œufs ayant été déposés à la fin de l'été précédent). Pour beaucoup d'espèces de moustiques et pour la grande majorité des espèces de mouches noires, cette période représente la seule opportunité de reproduction au cours de l'année (Gouvernement du Canada, 2003). Ces espèces sont dites univoltines, c'est-à-dire qu'elles ne se reproduisent qu'une seule fois par année. Après que le développement larvaire ait été complété, c'est donc vers la fin du printemps et au début de l'été que l'abondance maximale des moustiques adultes est atteinte. Dans le cas des mouches noires, la nécessité d'un long développement larvaire chez plusieurs espèces, est compensée par une éclosion automnale des œufs. Les larves de ces espèces se développent donc tout au long de l'hiver permettant ainsi une émergence hâtive des adultes au printemps qui coïncide à peu près avec celle de la majorité des espèces de moustiques (Gouvernement du Canada, 2003). Les espèces de mouches noires dont les œufs éclosent au printemps (le développement larvaire de ces dernières est beaucoup plus rapide) émergent également en grand nombre à cette période.

C'est donc en juin et au début juillet que l'inconfort causé à la population humaine atteint les niveaux les plus élevés. Pour limiter l'abondance des adultes suivant cette période d'émergence intense, il faut cependant combattre les larves au cours des semaines précédentes, soit dès le début mai. Pour réduire de façon satisfaisante les populations d'insectes piqueurs tout au long de l'été (réduction d'environ 80 %), il convient généralement de poursuivre les traitements jusqu'au mois de septembre. Cela permet de contrôler efficacement les populations des espèces multivoltines. Ces dernières pondent plusieurs générations d'œufs par année et sont donc présentes tout au long de la saison. Certaines de ces espèces peuvent même atteindre une abondance adulte maximale tard au cours de l'été.

Les programmes municipaux de contrôle des nuisances visent donc les espèces d'insectes piqueurs qui apparaissent tôt au printemps, mais dont certaines sont présentes durant toute la saison (par exemple, *Aedes vexans*). Les programmes de contrôle des nuisances ne traitent que les espèces printanières et estivales qui piquent l'homme, soit les espèces dites « passerelles ». Les programmes préventifs contre la transmission du VNO visent, quant à eux, les espèces qui sont les principaux vecteurs responsables de la transmission de ce virus, dont les *Culex*. Ces traitements sont effectués durant tout l'été.

5 PORTRAIT QUÉBÉCOIS

Bien que le nombre d'espèces d'insectes piqueurs soit relativement limité au Québec par rapport à ce qui est observé dans les pays tropicaux, leur nombre en termes d'individus peut atteindre des chiffres impressionnants, ce qui peut être particulièrement dérangeant pour la population de certaines régions. Une expertise dans la lutte contre ces insectes a donc été développée au Québec dans les dernières décennies. Les premiers programmes de contrôle des insectes piqueurs en sol québécois ont commencés avec le développement du nord de la province dans les années 70. Depuis cette époque, plusieurs insecticides chimiques ont été utilisés à cette fin, notamment le malathion, le chloropyrifos, le méthoprène, le diflubenzuron et le fenthion. Aujourd'hui, le produit le plus utilisé est cependant le *Bti* qui présente des avantages en termes de sécurité à la fois pour la santé humaine que pour l'environnement et à l'occasion, du méthoprène.

Comme pour les autres pesticides utilisés dans des milieux aquatiques, le *Bti* et le méthoprène sont classés parmi les produits à usage restreint selon la classification fédérale (ARLA, 2001a; ARLA, 2001b) ce qui correspond aux classes un et deux du système de classement québécois (*Code de gestion des pesticides,* R.R.Q., c. P-9.3, r. 0.01). En vertu de l'article 22 de la *Loi sur la qualité de l'environnement* (R.R.Q., c. Q-2, r. 1.001), quiconque entreprend une activité impliquant le déversement de contaminants dans une étendue d'eau doit préalablement obtenir un certificat d'autorisation du ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs (MDDEP). Les municipalités et les particuliers désirant traiter une étendue d'eau pour y limiter la reproduction d'insectes piqueurs doivent donc remettre un plan détaillé de leur projet (description, objectif, localisation, produit contaminant utilisé avec concentration, etc.) aux autorités concernées. Au cours des quinze dernières années, les projets nécessitant une telle autorisation ont augmenté considérablement au Québec passant d'environ 5 projets autorisés, à plus d'une vingtaine de projets par année (tableau 1).

Au début, les demandes venaient principalement des chantiers hydroélectriques, des secteurs miniers et des villes et régions où les insectes piqueurs sont très abondants et sont une source de nuisance élevée (en particulier l'Abitibi et la Côte-Nord). Récemment, plusieurs villes à vocation touristique se sont ajoutées à cette liste (Lacoursière et Boisvert, 2004). L'apparition du VNO au Québec a également provoqué une hausse dans le nombre de certificats d'autorisation émis pour le contrôle des insectes piqueurs au Québec. Certaines autorisations ont en effet été émises dans le cadre du *Plan d'intervention gouvernemental de protection de la santé publique contre le VNO* à l'été 2003, 2004 et 2005. Les citoyens de certaines municipalités sont aussi à l'origine des programmes de contrôle de la nuisance, soit par des pressions auprès des autorités municipales, soit par contact direct avec la firme possédant l'expertise dans ce domaine en vue d'améliorer leur qualité de vie; l'abondance de moustiques durant la saison estivale pouvant réduire considérablement leurs activités extérieures. Il est donc possible de penser que pour certaines de ces municipalités, l'apparition du VNO a été un élément nouveau qui, associé à la nuisance elle-même, a permis de sensibiliser davantage les citoyens aux traitements contre les insectes piqueurs. Ceci a pu populariser les mesures de contrôle auprès de la population (dans le contexte où

l'approbation des citoyens est souvent nécessaire à l'instauration d'un programme de contrôle) et conduire à des campagnes d'extermination additionnelles.

De manière générale, la population semble bien accepter les programmes de réduction de la nuisance. Les réticences rencontrées par rapport à ce type de traitements diminuent considérablement quand leur efficacité est constatée. Après plusieurs années de mise en œuvre, la tendance semble être à l'expansion des programmes de contrôle des insectes piqueurs, plutôt qu'à leur réduction (Tardif *et al*., 2003).

Tableau 1 Nombre de certificats d'autorisation émis pour le traitement contre les insectes piqueurs au Québec

Année	Nombre de certificats d'autorisation émis
1994	16
1995	18
1996	19
1997	17
1998	22
1999	20[1]
2000	Non disponible
2001	24
2002	24
2003	34[2]
2004	36[2]
2005	36[3]
2006	20[4]

Source : Bourque (2006)

[1] Résultats partiels (il manque les données de certaines directions régionales).

[2] En 2003 et en 2004, cinq certificats d'autorisation ont été émis dans le cadre du *Plan d'intervention gouvernemental de protection de la santé publique contre le VNO*.

[3] En 2005, quatre certificats d'autorisation ont été émis dans le cadre du *Plan d'intervention gouvernemental de protection de la santé publique contre le VNO*.

[4] En date du 28 mars 2006.

Note : De 2002 à 2006, il manque les données de la direction régionale Mauricie-Centre-du-Québec.

6 RÉFÉRENCES

Agence de réglementation de la lutte antiparasitaire (ARLA) (2001a) *Fiche technique sur l'utilisation du méthoprène dans les programmes de lutte contre les moustiques*. Accessible au : http://www.pmra-arla.gc.ca/francais/pdf/fact/fs_methoprene-f.pdf. (Consulté le 25-11-2004).

Agence de réglementation de la lutte antiparasitaire (ARLA) (2001b) *Fiche technique sur le Bacillus thuringiensis variété israelensis (Bti)*. Accessible au : http://www.pmra-arla.gc.ca/francais/pdf/fact/fs_bti-f.pdf. (Consulté le 25-11-2004).

Bourque, J.-F. (2006) *Communication personnelle*. Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs, Service des pesticides.

Bourque, J.-F. (2004) *Communication personnelle*. Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs, Service des pesticides.

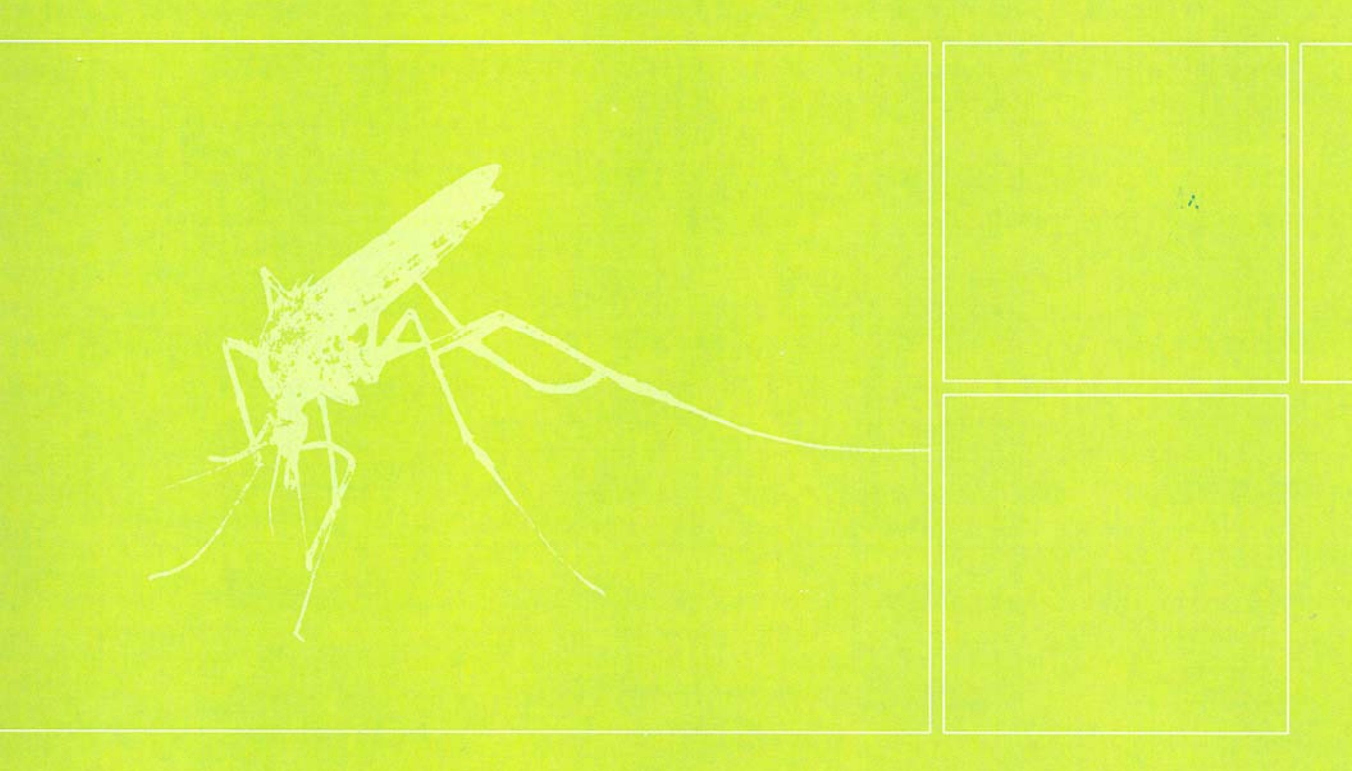
Gouvernement du Canada (2003) *Black flies* (*Simuliidae*). Accessible au : http://res2.agr.gc.ca/ecorc/diptera/bf11-dp_e.htm. (Consulté le 08-12-2004).

Lacoursière, J. O., Boisvert, J. (2004) *Le Bacillus thuringiensis israelensis et le contrôle des insectes piqueurs au Québec*. Accessible au: http://www.menv.gouv.qc.ca/pesticides/virus-nil/bti/index.htm. (Consulté le 25-11-2004).

Maire, A., Aubin, A. (1980) *Les moustiques du Québec (diptera : culicidae) - Essai de synthèse écologique*. Société d'entomologie du Québec, No 6, 107 p.

Tardif, I., Bolduc, D. G., St-Laurent, L., Samuel, O., Pinsonneault, L., Chevalier, P. (2003) *Pertinence et faisabilité, en 2003, d'un programme préventif de réduction du risque de transmission du virus du Nil occidental avec des larvicides : document de soutien.* Institut national de santé publique du Québec, Direction des risques biologiques, environnementaux et occupationnels, 55 p.

N^o de publication : 531



Étude d'impact stratégique
du Plan d'intervention gouvernemental
de protection de la santé publique
contre le virus du Nil occidental

